

## Dokumentation

# Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken SynAKS für Deutschland

*Berechnung – Qualitätssicherung - Anwendung*

Erstellt von: Klaus Bigalke (METCON)  
Matthias Rau (IB Rau)  
Katja Anke (IB Rau)  
Fabian Hüftle (IB Rau)  
Alexander Lohse (METCON)

Heilbronn / Pinneberg im Oktober 2013

*(Version 1.1)*

## **Inhaltsverzeichnis**

Vorbemerkungen .....	1
1 Einleitung .....	3
2 Berechnungsverfahren .....	6
2.1 Verfahrenskonzept .....	6
2.2 Datenbasis .....	10
2.2.1 Reanalysedaten .....	10
2.2.2 Clusteranalyse .....	11
2.2.3 Topographie .....	12
2.2.4 Bedeckung .....	13
2.3 Modell METRAS PC .....	15
2.4 Prognostische Windfeldberechnungen .....	16
2.4.1 Testrechnungen zur Modellgebietsgröße .....	16
2.4.2 Produktionsrechnungen .....	17
2.5 Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken .....	19
3 Voruntersuchungen .....	21
3.1 Anzahl und Verteilung der Cluster .....	21
3.2 Gitterauflösung .....	28
4 Qualitätssicherung .....	33
4.1 Windfeldmodellierung .....	33
4.2 Qualitätssicherung im Berechnungsverfahren .....	35
4.3 Flächendeckende Plausibilitätsprüfung .....	36
4.4 Stationsbezogene Repräsentativitätsprüfung .....	37
4.4.1 Zur unterschiedlichen räumlichen Repräsentativität von Messungen und synthetischen Daten .....	37
4.4.1.1 Horizontale Repräsentativität .....	38
4.4.1.2 Höhenbezug .....	40
4.4.1.3 Mögliche Fehlerquellen .....	41
4.4.1.4 Qualität der Datenquelle bei Messungen .....	41
4.4.1.5 Fazit .....	42
4.4.2 Zum Vergleich synthetischer Daten mit Messdaten .....	42
4.4.3 Beispielhafte Vergleiche an Messstationen .....	45
4.4.3.1 Gruppe 1 .....	45
4.4.3.2 Gruppe 2 .....	49
4.4.3.3 Gruppe 3 .....	54
4.5 Plausibilitätsprüfung im Einzelfall .....	57
4.6 Repräsentativitätsprüfung im Einzelfall .....	58
5 Literatur .....	60
Anhang Stationsdarstellungen .....	62

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Flächenabdeckung Deutschlands mit synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) in einer räumlichen Auflösung von 500 m. ....	5
Abbildung 2:	Illustration des statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text). ....	7
Abbildung 3:	Illustration des modifizierten statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text). ....	8
Abbildung 4:	Illustration des Cluster-Zeitserien-Verfahrens zur Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken (Erläuterungen im Text). ....	9
Abbildung 5:	Lage der Stützstellen mit NCAR-Reanalyseedaten für Deutschland. ....	11
Abbildung 6:	Reduzierung der Anzahl meteorologischer Antriebssituationen mittels Clusteranalyse. Jeder Datenpunkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten u und v (x- und y-Achse) und einen Temperaturgradienten (Farbe des Datenpunktes) definiert. ....	12
Abbildung 7:	Abbildung der realen topographischen Verhältnisse (links) auf mittlere Geländehöhen (Mitte) und Landnutzungen (rechts) in jeder Modell-Gitterzelle. ....	13
Abbildung 8:	Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade im Jahresverlauf (links) und Tagesverlauf (rechts) für Hamburg (oben, nach [16]) und München (unten, nach [17]). ....	14
Abbildung 9:	Auf Basis der physikalischen Gesetze für die Atmosphäre und Daten zum Modellgebiet und der großräumigen meteorologischen Situation berechnet METRAS PC die bodennahen Windsysteme. ....	16
Abbildung 10:	Beispiel für ein mit METRAS PC berechnetes bodennahes Windfeld im Großraum Stuttgart bei stabil geschichteter Atmosphäre und schwachem östlichen Höhenwind. ....	18
Abbildung 11:	Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4402500 / 5485500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts). ....	24
Abbildung 12:	Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4404500 / 5482500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts). ....	25
Abbildung 13:	Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4405000 / 5485500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts). ....	26
Abbildung 14:	Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4419500 / 5442500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts). ....	27
Abbildung 15:	Standort der DWD-Station Wendelstein (links: Bildquelle © 2012 Google Inc. Alle Rechte vorbehalten. Google Earth™ ist eine Marke von Google Inc.) und gemessene Windrose 2001-2010 (rechts). ....	29
Abbildung 16:	Synthetische Windrosen in 500 m Auflösung im Bereich des Wendelstein-Massivs (Bildquelle © 2012 Google Inc. Alle Rechte vorbehalten. Google Earth™ ist eine Marke von Google Inc.). ....	29
Abbildung 17:	Synthetische Windrosen in 150 m Auflösung im Bereich des Wendelstein-	

Massivs (Bildquelle © 2012 Google Inc. Alle Rechte vorbehalten. Google Earth™ ist eine Marke von Google Inc.) .....	30
Abbildung 18: Gemessenes und berechnetes Jahresmittel der Windgeschwindigkeit an Messstationen unterschiedlicher orographischer Exposition. ....	31
Abbildung 19: Vom Standort abhängige horizontale Repräsentativität von Messungen (links) und einheitliche Repräsentativität synthetischer Windstatistiken auf Modellgitterflächen von 500 m Kantenlänge (rechts). ....	39
Abbildung 20: Windgeschwindigkeitsprofil über der Verdrängungshöhe. ....	41
Abbildung 21: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der DWD-Station Mannheim (oben) und der nächstgelegenen SynAKS (unten). ....	47
Abbildung 22: 3x3-Windrosenbeet in Google Earth™ (links) und Darstellung der Geländestruktur (rechts) im Umfeld der DWD-Station Mannheim. ....	48
Abbildung 23: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der DWD-Station Wasserkuppe (oben), und der nächstgelegenen SynAKS (Mitte) sowie der LUG-Station Wasserkuppe (unten), welche ca. 218 m weiter südwestlich aber noch auf dem Gipfelplateau steht. ....	52
Abbildung 24: LUG-Station Wasserkuppe – Messcontainer. ....	52
Abbildung 25: 3x3-Windrosenbeet in Google Earth™ (links) und Darstellung der Geländestruktur (rechts) im Umfeld der DWD-Station und der LUG-Station auf der Wasserkuppe. ....	53
Abbildung 26: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der LUG-Station Frankfurt-Höchst (oben) und der nächstgelegenen SynAKS (unten). ....	55
Abbildung 27: 3x3-Windrosenbeet in Google Earth™ (links) und Darstellung der Geländestruktur (rechts) im Umfeld der LUG-Station Frankfurt-Höchst. ....	56
Abbildung 28: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der LUG-Station Frankfurt-Ost. ....	56
Abbildung 29: Synthetische Windrosen dargestellt in Google Earth™ im Gebiet um Schramberg. ....	58

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Unterschiedliche Merkmale gemessener und synthetischer Windstatistiken. ....	42
---	----

## **Vorbemerkungen**

Seit mehr als einem Jahrzehnt werden von der Arbeitsgemeinschaft METCON – IB Rau synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken berechnet. In einer Vielzahl von Veröffentlichungen, Projektberichten, Vorträgen auf Konferenzen und in diversen Gremien und im Internet wurden jeweils einzelne Teilaspekte der Berechnungsverfahren, Vergleiche mit Messungen, Untersuchungen hinsichtlich der Verwendbarkeit in Immissionsprognosen, Hinweise für Anwender u.a.m. dokumentiert und diskutiert.

Mit der vorliegenden Dokumentation wird ein Großteil der bisher verstreut vorliegenden und nur teilweise allgemein zugänglichen Informationen an zentraler Stelle zusammengefasst und frei verfügbar gemacht. Beschrieben werden die zur Erstellung der synthetischen Daten benötigten Eingangsdaten, das Berechnungsverfahren sowie Ergebnisse wichtiger Voruntersuchungen. Der Schwerpunkt liegt auf der Qualitätssicherung, die sich neben der Verfahrensdokumentation auf evaluierte Modellansätze, geregelte Arbeitsabläufe im Berechnungsverfahren und festgelegte Prüfschritte zur Qualitätskontrolle stützt.

Diese Dokumentation behandelt die *Synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) für Deutschland*. Berechnung, Qualitätssicherung und Anwendung der *Synthetisch repräsentativen Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynRepAKTerm) für Deutschland* werden in einer weiteren Dokumentation [1] beschrieben.

### Quellenhinweise:

An mehreren Stellen werden Messdaten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) dargestellt. Die Datenbasis dieser Messdaten stammt aus der so genannten Grundversorgung des DWD (<http://www.dwd.de/grundversorgung>). Abbildungen basieren auf eigenen Bearbeitungen der Messdaten (statistische Auswertungen, Berechnung abgeleiteter Größen wie z.B. Ausbreitungsklassen, usw.).

Weitere Messdaten wurden aus den Messnetzen der nachfolgend aufgeführten Bundesländer herangezogen:

- Baden-Württemberg  
([http://mnz.lubw.baden-wuerttemberg.de/messwerte/langzeit/mp\\_akt/ms\\_akt\\_index.htm](http://mnz.lubw.baden-wuerttemberg.de/messwerte/langzeit/mp_akt/ms_akt_index.htm))
- Brandenburg  
(<http://www.lugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.297627.de>)
- Hessen  
(<http://www.hlug.de/start/luft/luftmessnetz.html>)
- Niedersachsen  
([http://www.umwelt.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation\\_id=2250&article\\_id=9107&](http://www.umwelt.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=2250&article_id=9107&))

\_psmand=10)

- Nordrhein-Westfalen  
([http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/aktluftqual/eu\\_luft\\_akt.htm](http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/aktluftqual/eu_luft_akt.htm))
- Sachsen  
(<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/luft/3649.htm>)

## **1 Einleitung**

Viele Fragestellungen in den Bereichen Luftreinhaltung und Regionalklima erfordern Kenntnisse über die im Untersuchungsgebiet im langjährigen Mittel repräsentativen bodennahen Windverhältnisse. So werden beispielsweise bei der Prognostizierung von Schadstoffimmissionen (Luftschadstoffe, Gerüche) im Nahbereich von Industriebetrieben, genehmigungsbedürftigen Anlagen, Straßen etc. bevorzugt mikroskalige Ausbreitungsmodelle eingesetzt. Zur Ermittlung von statistischen Kenngrößen (Jahresmittelwerte, Perzentile) benötigen diese Modelle als Antrieb eine für das Untersuchungsgebiet repräsentative Windstatistik, die nicht durch lokale Effekte geprägt ist. Des Weiteren besteht im Rahmen von Standortprüfungen oder Regionalklimafragen ein Bedarf an Windstatistiken mit größerem Repräsentativitätsbereich, die keinen spezifischen kleinräumigen Effekten unterliegen. Da die von den Landesbehörden, dem Deutschen Wetterdienst sowie von Privatanbietern betriebenen stationären Messnetze nur aus einer beschränkten Anzahl von Messstationen bestehen und diese, je nach vorrangiger Messaufgabe, häufig lokal beeinflusst sind, müssten bei vielen Fragestellungen des Immissionsschutzes bzw. des Regionalklimas über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr Windmessungen durchgeführt werden, um eine für einen Anlagenstandort oder ein Untersuchungsgebiet repräsentative Windstatistik zu erhalten. Dies scheidet in aller Regel am zeitlichen und finanziellen Aufwand. Man behilft sich daher meist mit der Übertragung der Winddaten einer nächstgelegenen, langjährig betriebenen Station auf den zu untersuchenden Standort oder das Untersuchungsgebiet. Teilweise sind diese Übertragungsverfahren wenig abgesichert und führen mitunter zu ungenauen Ergebnissen. Vor allem in orographisch stark gegliedertem Gelände mit einer starken lokalen Prägung der gemessenen Windverteilung ist eine Übertragung oft nicht mehr zu verantworten.

Bei der METCON Umweltmeteorologischen Beratung wurde bereits um die Jahrtausendwende in zwei Forschungsprojekten (EUROLAKES, GETAS) ein Verfahren entwickelt, um auf Basis von Windfeldsimulationen mit dem nicht-hydrostatischen mesoskaligen Modell METRAS sowie synoptischen Höhendaten räumlich hoch auflösende synthetische Windstatistiken für die bodennahen Verhältnisse in gegliedertem Gelände zu berechnen. In diesen Projekten stand die Bereitstellung meteorologischer Antriebsdaten für hydrodynamische Simulationsmodelle im Vordergrund.

Die Nachfrage nach standortrepräsentativen Winddaten im Rahmen von Genehmigungsverfahren, für Fragen der Bauleitplanung oder im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen war Anfang des Jahrtausends für Baden-Württemberg der Auslöser, ein Projekt zur Berechnung von synthetischen Windstatistiken in einem Raster von 500 x 500 m<sup>2</sup> zu initiieren. Dieses von der Arbeitsgemeinschaft METCON (Pinneberg) und IB Rau (Heilbronn) durchgeführte Projekt wurde im Jahr 2006 erfolgreich abgeschlossen. Damit standen für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg synthetische Windstatistiken, also 2-dimensionale Häufigkeitsverteilungen von

Windrichtung und Windgeschwindigkeit, zur Verfügung.

Bei Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft Anhang 3, Abs. 8 [2] wird ein vollständiger meteorologischer Datensatz benötigt. Dieser besteht neben Windgeschwindigkeit und Windrichtung noch aus einem Stabilitätsmaß der Atmosphäre (Monin-Obukhov-Länge bzw. Ausbreitungsklasse). Bei synthetischen Windstatistiken handelt es sich um 2-parameterige Statistiken, die kein Stabilitätsmaß beinhalten. Das Stabilitätsmaß "Ausbreitungsklasse" wird an Stationen des DWD aus visuellen Wolkenbeobachtungen bestimmt. Visuelle Wolkenbeobachtungen werden an den DWD-Stationen immer weiter reduziert und voraussichtlich zukünftig ganz eingestellt. Automatische Messungen mit „Sky Imager“ können derzeit visuelle Beobachtungen noch nicht vollständig ersetzen. Wegen der dünnen Datenlage zur Ermittlung von Ausbreitungsklassenstatistiken auf Basis gemessener Daten ist es in der gutachtlichen Praxis üblich, die Ausbreitungsklassen von einer Station des DWD auf einen interessierenden Standort zu übertragen, um aus einer berechneten oder gemessenen 2-parametrischen Windstatistik eine 3-parametrische Ausbreitungsklassenstatistik zu erzeugen. Dabei wurde und wird meist das Kolb-Verfahren [3] angewendet, wobei sich je nach Gutachter und verwendeten Datensätzen die ermittelten Ausbreitungsklassenstatistiken am Standort zum Teil deutlich unterscheiden können.

Dieser Mangel an Konsistenz und die berechtigte Kritik an den Übertragungsverfahren gaben im Jahr 2006 den Ausschlag für erste Entwicklungsarbeiten innerhalb der ARGE METCON und IB Rau an einem zunächst so genannten „modifizierten Kolb-Verfahren“. Darauf aufbauend wurde das „Cluster-Zeitserien-Verfahren“ entwickelt, auf dessen Basis in einem weiteren Projekt im Jahr 2007 für das Land Baden-Württemberg flächendeckend synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) berechnet wurden [4].

In der Folgezeit wurde durch die ARGE damit begonnen, synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken für all die Gebiete Deutschlands zu berechnen, in denen die charakteristischen Windverhältnisse nennenswert durch orographische Einflüsse geprägt sind. Dieses Vorhaben wird voraussichtlich zum Jahresende 2013 abgeschlossen sein. Die dann vorliegende Flächenabdeckung mit SynAKS in einem 500 m-Raster ist in der Abbildung 1 dargestellt. Aus den Berechnungen für insgesamt 53 Teilgebiete liegen damit zwischen Bodensee und Bremen nahezu flächendeckend in einem 500 m-Raster synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken vor. Eine Visualisierung der in den SynAKS enthaltenen synthetischen Windstatistiken einschließlich der jahresgemittelten Windgeschwindigkeiten ist in dem Produkt Google Earth™ der Google Inc. möglich. Hierzu werden Kacheln von 10 x 10 km<sup>2</sup> Größe als *KMZ*<sup>1</sup>-Datei zur Einbindung in Google Earth™ bereitgestellt („SynWSGE“). Beide Produkte, SynAKS und SynWSGE, können über die metSoft GBR (Heilbronn) bezogen werden.

In den vergangenen Jahren hat es konsequente Weiterentwicklungen und Verbesserungen an

---

<sup>1</sup> Das *KMZ* Dateiformat ist eine datenkomprimierte KML-Datei im ZIP-Format und kann vom Anwender unmittelbar eingelesen werden.

dem Berechnungsverfahren und der Bezugsdekade gegeben. Die aktuelle Version 2.05 der SynAKS ist ein bundesweit homogener Datensatz, der auf einem für alle Teilgebiete einheitlichen Berechnungsansatz beruht und die Bezugsdekade 01.01.2001 – 31.12.2010 abbildet.

In dieser Dokumentation werden zunächst die Eingangsdaten, das verwendete Simulationsmodell sowie das Cluster-Zeitreihen-Verfahren zur Berechnung der SynAKS vorgestellt. Daran anschließend werden die Qualitätssicherungsmaßnahmen erläutert. Diese umfassen die allgemeine Qualitätssicherung des verwendeten Modells, die laufenden Qualitätssicherungsmaßnahmen, die während der Berechnungen für jedes Teilgebiet vorgenommen werden und schließlich die Qualitätskontrolle der aus dem Verfahren gewonnenen synthetischen Daten unter Berücksichtigung ihrer räumlichen Repräsentativität.

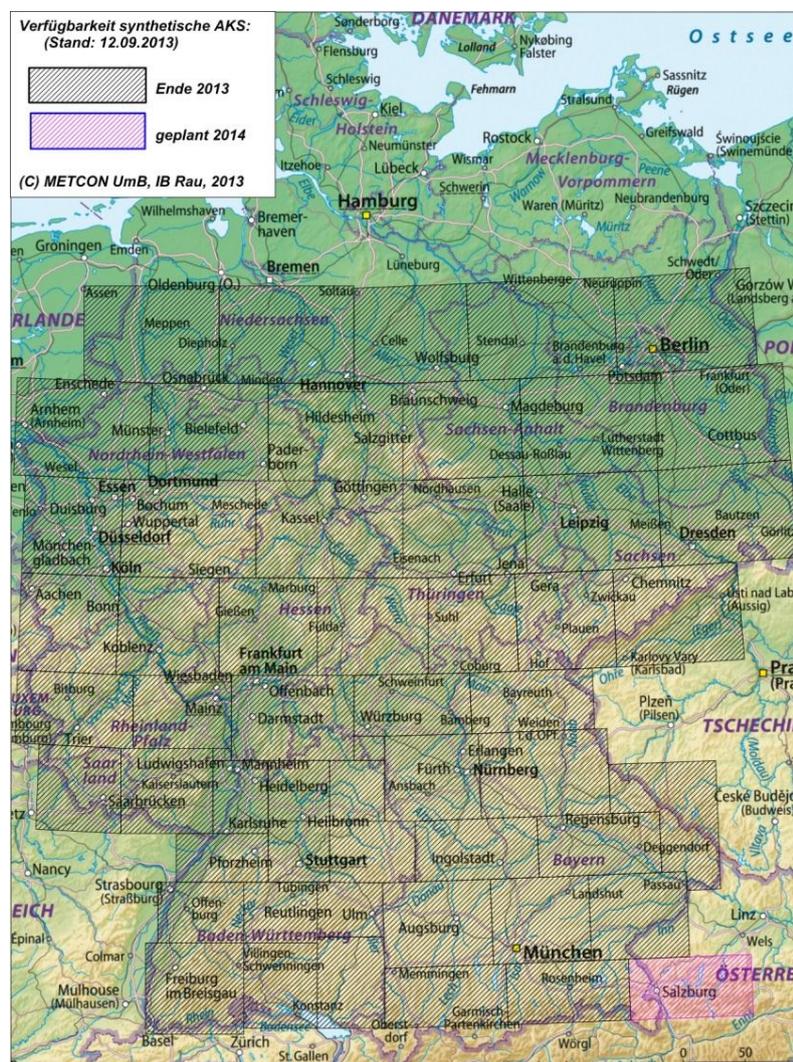


Abbildung 1: Flächenabdeckung Deutschlands mit synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) in einer räumlichen Auflösung von 500 m.

## 2 Berechnungsverfahren

Vorab ist ein häufiges Missverständnis zu klären: Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken sind

- *nicht* gemessen,
- *nicht* aus gemessenen Windstatistiken interpoliert oder anders abgeleitet,
- enthalten *keine* direkten Informationen aus bodennahen Messungen und
- sind – anders als Messungen - *nicht* als punktbezogene Informationen zu verstehen.

Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken werden vielmehr ohne Messungen vor Ort durch Zusammenführung von topographischen und meteorologisch-statistischen Informationen sowie aus den Ergebnissen von Modellrechnungen künstlich („synthetisch“) hergestellt. Sie repräsentieren die mittleren Verhältnisse über Bezugsflächen, die der räumlichen Auflösung der zugrunde liegenden Modellrechnungen entsprechen. In der aktuellen Version haben die Bezugsflächen eine Größe von 500 x 500 m<sup>2</sup>.

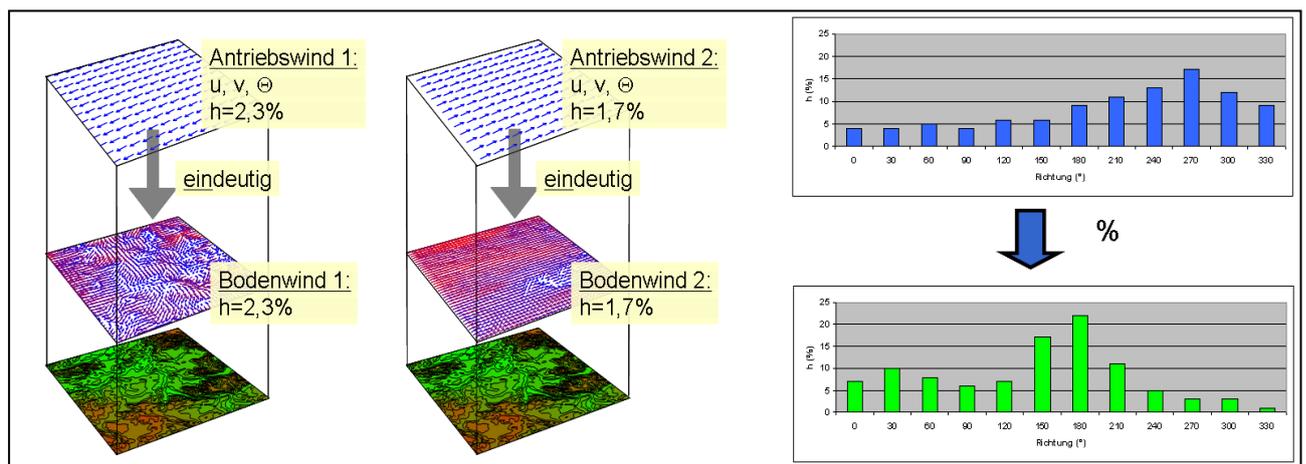
### 2.1 Verfahrenskonzept

Die Erdoberfläche mit ihren wechselnden Geländehöhen und Flächennutzungen beeinflusst die Windverhältnisse und andere atmosphärische Größen ganz erheblich. Jedoch ist oberhalb der bodennahen Grenzschicht, die sich in Mitteleuropa über einige hundert Meter bis etwa 2 km Höhe erstrecken kann, der Einfluss des Bodens nur noch gering. Die atmosphärischen Verhältnisse werden dort fast nur noch von der großräumigen Wetterlage bestimmt.

Die Grundidee des Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken beruht auf dem Konzept des **statistisch-dynamischen Ansatzes**, wie er in [5] beschrieben wird. Dieser Ansatz geht davon aus, dass das lokale bodennahe Windklima eindeutig von wenigen Parametern des übergeordneten großskaligen Windklimas und deren langjährigen Häufigkeiten sowie der Geländeoberfläche bestimmt wird. Das großskalige Windklima wird durch die Häufigkeit einer Anzahl charakteristischer Klassen („Cluster“), deren mittleren Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten sowie der Schichtung charakterisiert. Die Charakterisierung der Geländeoberfläche erfolgt durch die topographischen Gegebenheiten (Landnutzung, Geländehöhe). Außerdem wird angenommen, dass thermodynamisch bedingte Windsysteme im Vergleich zu der durch den großskaligen Druckgradienten (geostrophischer Wind) angetriebenen Strömung vernachlässigbar sind. Wird jede dieser großskaligen repräsentativen Situationen mit einem geeigneten Windfeldmodell stationär simuliert, so resultieren daraus die jeweils zugehörigen mesoskalig geprägten bodennahen Strömungsmuster. Die bodennahe Windstatistik an jedem Gitterpunkt ergibt sich dann aus der Wichtung des für jedes Cluster am Gitterpunkt bodennah simulierten Windes mit dessen relativer Häufigkeit.

Diese Grundidee ist in der Abbildung 2 illustriert: Zu jeder großräumigen Wettersituation („Antriebswind 1“, „Antriebswind 2“ usw.) wird jeweils eine so genannte dynamische Modellsimulation durchgeführt. Daraus werden eindeutige, mit diesen Wettersituationen verbundene Bodenwindfelder berechnet. Während die Höhenwinde recht homogen sind, stellen sich bodennah unter Umständen sehr heterogene Windfelder ein. Jede Höhenwindsituation ist im langjährigen Mittel mit einer bestimmten Auftrittshäufigkeit verknüpft. Somit tritt auch das zugehörige Bodenwindfeld mit der gleichen Häufigkeit auf. Für jeden Ort im Modellgebiet kann durch gewichtete Mittelung aller dort berechneten Bodenwinde eine Windstatistik abgeleitet werden. In der Abbildung 2 ist rechts beispielhaft skizziert, wie damit eine 30°-Windrichtungsverteilung im Höhenwind (blau) auf eine bodennahe Windrichtungsverteilung (grün) an einen bestimmten Ort abgebildet wird.

Mit diesen Modellrechnungen können alle dynamisch bedingten Einflüsse des Geländes auf das bodennahe Windklima erfasst werden. Dazu gehören beispielsweise Leewirbel hinter Bergen, Kanalisierungen des Windes in Tälern oder Abbremsen des Windes über rauem Gelände (Wald, Bebauung).



*Abbildung 2: Illustration des statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text).*

In vielen Teilen Deutschlands ist eine wesentliche Voraussetzung dieses kurz geschilderten statistisch-dynamischen Ansatzes, der lediglich dynamische Windsysteme berücksichtigt, nicht erfüllt. Häufig spielen thermisch bedingte Windsysteme, wie zum Beispiel Kaltluftwindsysteme, eine erhebliche Rolle. Nächtliche Kaltluftabflusssysteme bilden sich bevorzugt bei schwachwindigen Strahlungswetterlagen mit dem Einsetzen einer negativen Strahlungsbilanz kurz vor Sonnenuntergang aus und können bis in die Vormittagsstunden anhalten. Nach [6] können solche Kaltluftwindsysteme beispielsweise in Tälern des Nordschwarzwaldes in Einzelfällen bis zu 17 Stunden andauern und sich auch unter reduzierten Ausstrahlungsbedingungen (Bewölkung) ausbilden. Da sich mit der nächtlichen Ausstrahlung die bodennahen Luftschichten vom Boden

ausgehend stabilisieren und häufig von den Strömungsverhältnissen der darüber liegenden Luftschichten abkoppeln, können Kaltluftabflüsse auch dann noch beobachtet werden, wenn oberhalb der Bodeninversion ein übergeordneter Wind mit schwacher bis mittlerer Windgeschwindigkeit vorliegt. In Messungen zeigt sich der Einfluss thermisch bedingter Windsysteme auf die charakteristischen lokalen Windverhältnisse häufig in Form ausgeprägter „Kaltluftsektoren“ in den Windrichtungsverteilungen bei stabilen Schichtungsverhältnissen.

Um diesem Phänomen in den synthetischen Windstatistiken Rechnung tragen zu können, wurde das statistisch-dynamische Verfahren erweitert. In dem **modifizierten statistisch-dynamischen Verfahren** werden neben den stationären dynamischen Modellrechnungen zusätzlich Modellrechnungen für windschwache Strahlungswetterlagen durchgeführt, um regional bedeutsame thermische Windsysteme wie diese nächtlichen Kaltluftabflüsse zu erfassen. Je nach Auftrittshäufigkeit solcher Wetterlagen werden diese dann in die statistische Auswertung der Modellrechnungen für jeden Ort eingebunden. In der Abbildung 3 ist der erweiterte Verfahrensablauf als Prinzipskizze dargestellt.

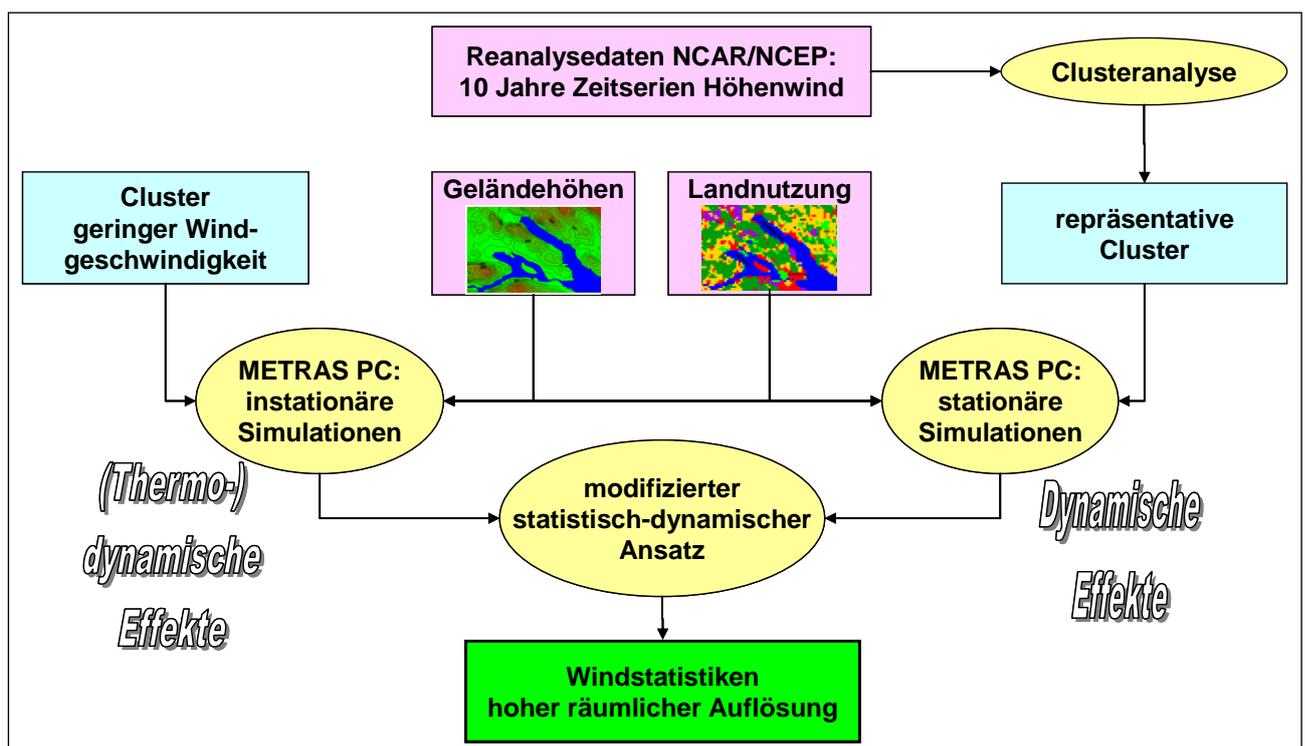


Abbildung 3: Illustration des modifizierten statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text).

Um die synthetische Windstatistik auf eine Ausbreitungsklassenstatistik zu erweitern, werden Informationen zur Auftretenshäufigkeit der einzelnen Ausbreitungsklassen benötigt. Nach VDI 3782 Blatt 1 [7] hängt die aktuell herrschende Ausbreitungsklasse von Datum, Uhrzeit, Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe sowie dem Bedeckungsgrad ab. Folglich müssen über die reine Auftretenshäufigkeit der simulierten Cluster hinaus auch Informationen über deren zeitlichen

Bezug sowie über die Bedeckungsverhältnisse vorliegen. Dem trägt die Erweiterung des modifizierten statistisch-dynamischen Ansatzes auf ein **Cluster-Zeitserien-Verfahren** Rechnung. Die Antriebsdaten jedes Clusters werden aus einer 10-jährigen Zeitreihen von Reanalysedaten gewonnen, die die großräumigen Wettersituationen repräsentieren. Umgekehrt kann nach einmal erfolgter Festlegung der Cluster für jeden Datenpunkt der Zeitreihe berechnet werden, welches Cluster ihn repräsentiert. Daraus ergibt sich eine Cluster-Zeitserie. Der Bedeckungsgrad liegt jedoch nicht in der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung vor, um die Cluster-Zeitserie um den lokal und aktuell vorliegenden Bedeckungsgrad zu ergänzen. Allerdings stellen sich, wie weiter unten gezeigt wird, im langjährigen Mittel die Bedeckungsgrade als Funktion von Tages- und Jahreszeit in Deutschland relativ homogen dar. Somit kann zu jedem Zeitpunkt der Cluster-Zeitserie eine für den aktuellen Monat und die aktuelle Tageszeit im klimatologischen Mittel gültige Häufigkeitsverteilung vorgegeben werden. Deren statistische Auswertung wird weiter unten beschrieben. Die prinzipielle Funktionsweise des Cluster-Zeitserien-Verfahrens ist in Abbildung 4 skizziert.

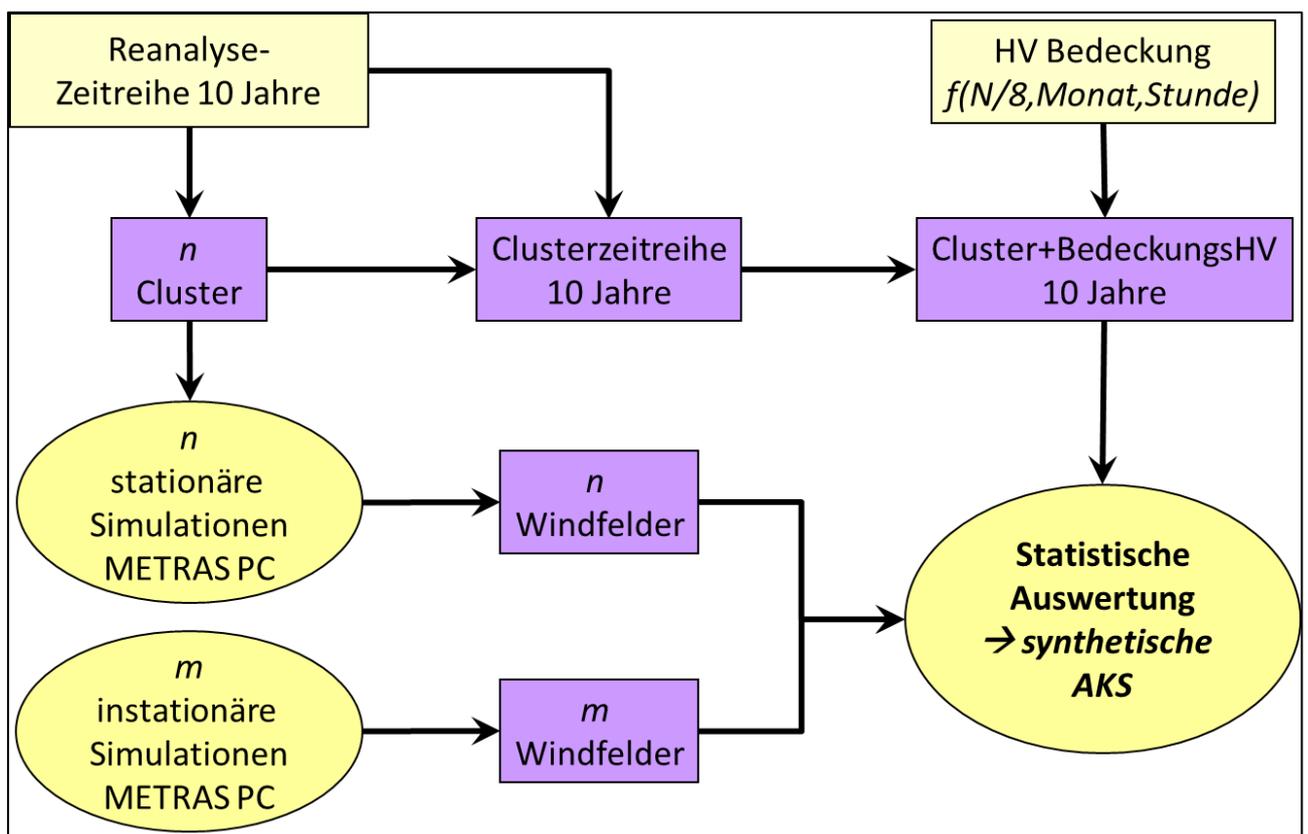


Abbildung 4: Illustration des Cluster-Zeitserien-Verfahrens zur Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken (Erläuterungen im Text).

Der große Vorteil des Cluster-Zeitserien-Verfahrens liegt darin, dass es unabhängig von einer regional gemessenen AKS ist. An Stelle der gemessenen AKS wird eine dreidimensionale Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade benötigt. Hierfür eignet sich praktisch jede

Häufigkeitsverteilung eines nicht zu exponierten Standortes in Mitteleuropa. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass sich die Wahl der Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade nur äußerst geringfügig auf die resultierenden synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken auswirkt. Dadurch ist das Verfahren praktisch unabhängig von Messdaten. Diese geringe Abhängigkeit von der aktuell tatsächlich vorliegenden Bedeckung ist vor allem darin begründet, dass Jahres- und Tageszeit sowie die Windgeschwindigkeit die wesentlichen Bestimmungsgrößen für die Ausbreitungsklasse sind. Der Bedeckungsgrad kann die resultierende Ausbreitungsklasse nur noch um eine Klasse modifizieren.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bausteine des Cluster-Zeitserien-Verfahrens zur Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken weiter erläutert.

## **2.2 Datenbasis**

### **2.2.1 Reanalysedaten**

Als Datenbasis für die meteorologischen Antriebsdaten der Windfeldmodellierungen wird eine charakteristische großskalige Klimatologie der von direkten Bodeneinflüssen unbeeinflussten unteren Atmosphäre benötigt. In den letzten Jahren werden immer mehr freie Datensätze veröffentlicht, die hierfür grundsätzlich geeignet sind, beispielsweise die Reanalysedaten aus dem ERA-Projekt des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Die Entwicklung des Cluster-Zeitserien-Verfahrens beruht jedoch auf den schon länger verfügbaren NCAR/NCEP-Reanalysedaten, die vom NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) bereitgestellt werden [8]. Sie basieren auf einer Datenassimilation von Messdaten (Bodenmessungen, Radiosonden, Satelliten usw.) in einem globalen Vorhersagemodell. Die NCAR-Reanalysedaten liegen seit 1979 zu täglich vier Terminen (0<sup>00</sup>, 6<sup>00</sup>, 12<sup>00</sup> und 18<sup>00</sup> UTC) auf einem globalen 2,5°-Gitter und allen Hauptdruckniveaus vor. Die Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Analysepunkte über Deutschland. Hier beträgt der mittlere Abstand zwischen den Stützpunkten etwa 175 km in West-Ost- und 275 km in Nord-Süd-Richtung.

Im Rahmen umfangreicher Analysen hat sich gezeigt, dass der aus den Druckgradienten der Reanalysedaten abgeleitete bodennahe geostrophische Wind am besten als Antrieb für die Windfeldmodellierung geeignet ist. Die Schichtung der unteren Atmosphäre wird am besten durch den potentiellen Temperaturgradienten im Höhenbereich zwischen 1000 hPa und 700 hPa repräsentiert.

Die statistische Analyse der meteorologischen Zeitreihen zur Bereitstellung von Modellantriebsdaten erfolgt für jedes Teilgebiet separat über den aktuellen 10-Jahreszeitraum 01.01.2001 – 31.12.2010. Aufgrund der räumlichen Diskretisierung der NCAR-Reanalysepunkte weisen die Antriebsdaten eine räumliche Variation auf, die jedoch innerhalb jedes berechneten Teilgebietes gering ist.

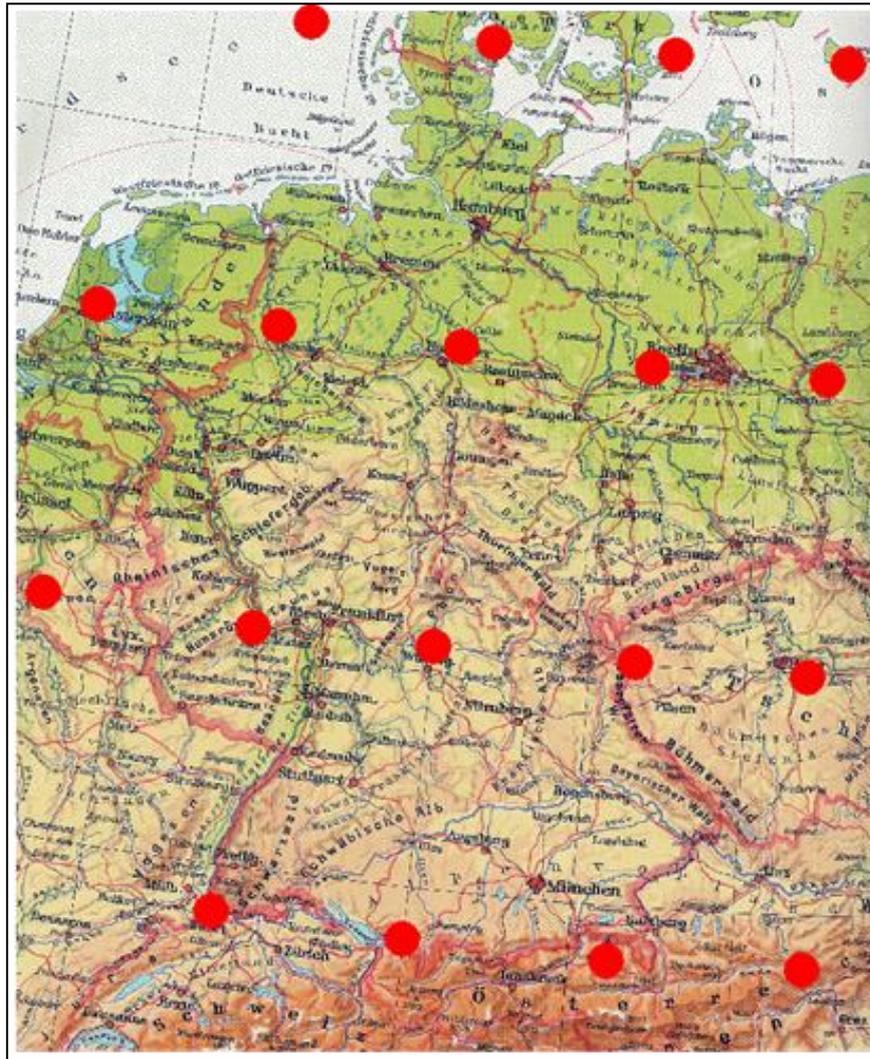


Abbildung 5: Lage der Stützstellen mit NCAR-Reanalysedaten für Deutschland.

### 2.2.2 Clusteranalyse

Eine zehnjährige Antriebszeitreihe umfasst etwa 14.600 meteorologische Situationen, die aufgrund der Datenmenge nicht alle simuliert werden. Daher werden die 14.600 Situationen mittels einer Clusteranalyse auf eine handhabbare Zahl meteorologischer Situationen reduziert, für die dann einzelne Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Eine Clusteranalyse funktioniert prinzipiell so, dass alle Datenpunkte, die eine ähnliche meteorologische Situation beschreiben, mithilfe einer gewichteten Mittelung zu einem neuen Datenpunkt zusammengefasst werden. Die Abbildung 6 veranschaulicht diesen prinzipiellen Vorgang. Auf der linken Seite sind alle Datenpunkte einer zehnjährigen Zeitreihe dargestellt. Jeder Datenpunkt ist definiert durch die beiden Komponenten  $u$  und  $v$  des geostrophischer Windes, die auf den  $x$ - und  $y$ -Achsen aufgetragen sind. Die Farbe eines Datenpunktes entspricht der zugehörigen Temperaturschichtung. Als Ergebnis der Clusteranalyse (rechts) liegen Modellantriebsdaten für eine begrenzte Anzahl meteorologischer Situationen vor, die in ihren statistischen Eigenschaften mit den ursprünglich 14.600 Situationen in guter Näherung übereinstimmen. Diese verdichteten Situationen (Cluster) werden dann mit dem Windfeldmodell

simuliert. Anhand von Voruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die auf Basis von 120 Clustern berechneten bodennahen Windstatistiken gemessene charakteristische Windverhältnisse gut wiedergeben. Eine Erhöhung der Clusteranzahl und damit verbunden eine verfeinerte Auflösung der meteorologischen Antriebssituation führt zu keiner nennenswerten Verbesserung in den berechneten Windstatistiken.

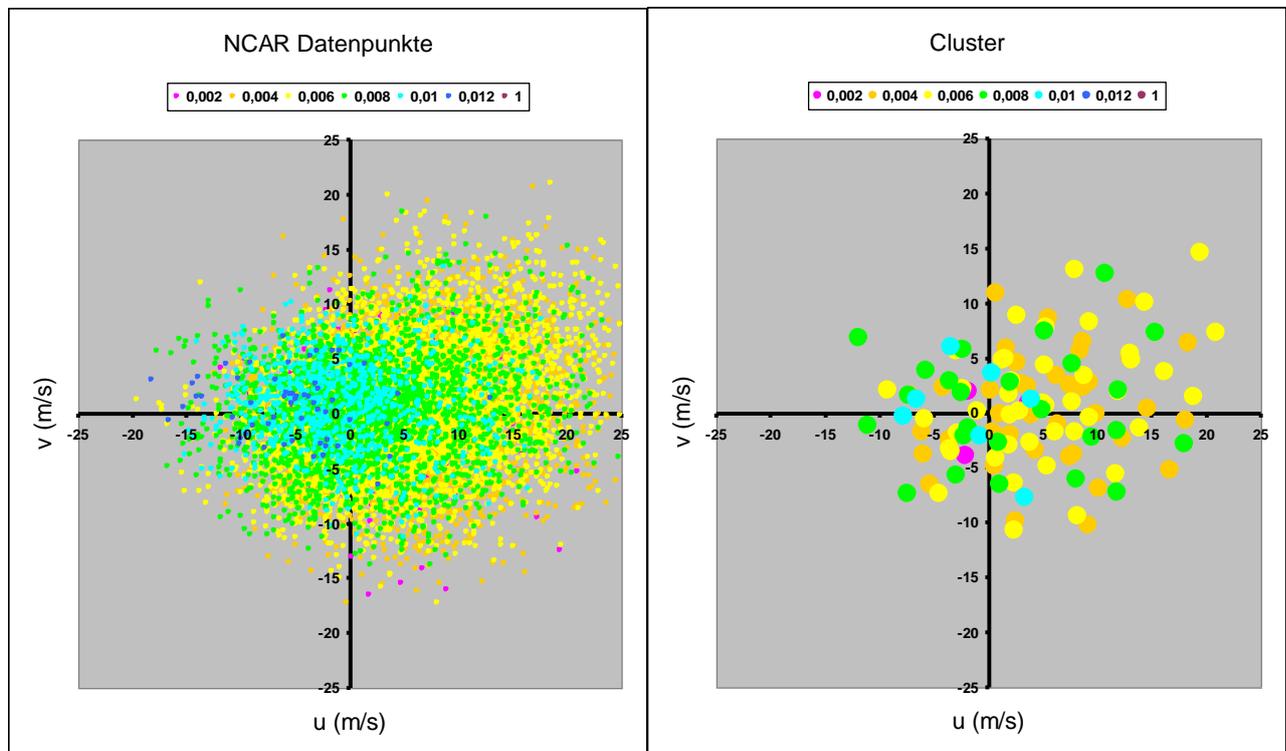


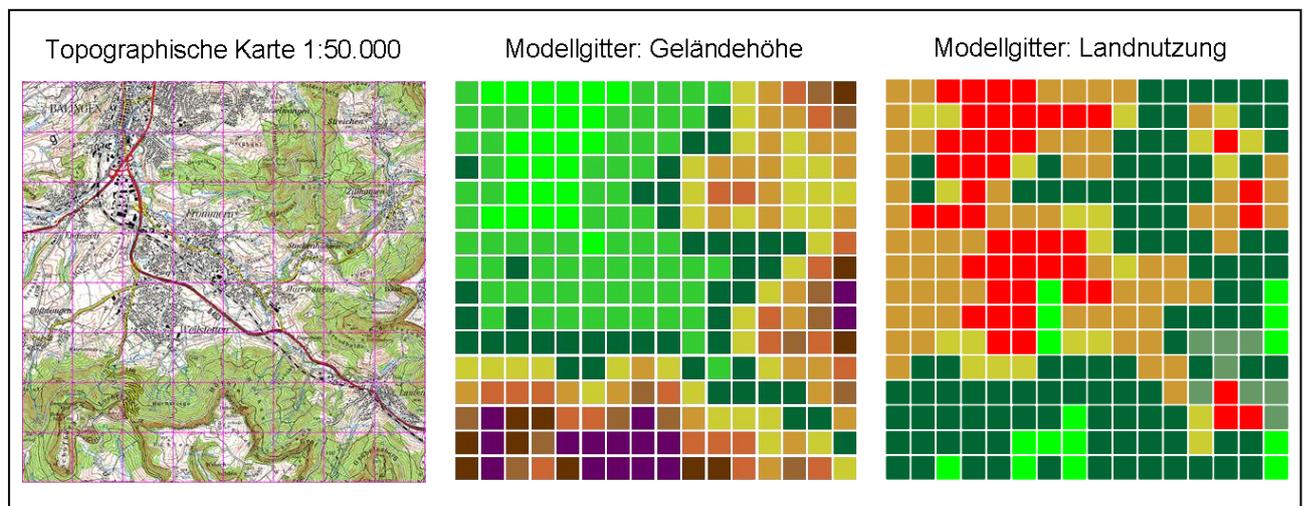
Abbildung 6: Reduzierung der Anzahl meteorologischer Antriebssituationen mittels Clusteranalyse. Jeder Datenpunkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten  $u$  und  $v$  ( $x$ - und  $y$ -Achse) und einen Temperaturgradienten (Farbe des Datenpunktes) definiert.

### 2.2.3 Topographie

Neben den meteorologischen Antriebsdaten müssen für die Modellrechnungen Topographiedaten, d.h. die Geländehöhen und die Landnutzungen, bereitgestellt werden. Hierfür werden die CORINE-Landnutzungsdaten [9] und Geländehöhen aus dem GlobDEM50-Datensatz [10] verwendet.

Die Abbildung 7 zeigt beispielhaft für einen Gebietsausschnitt einer topographischen Karte, wie die realen Verhältnisse unter Verwendung gerasterter Topographiedaten auf ein ebenfalls gerastertes Modellgitter abgebildet werden. Bei den Modellrechnungen wird das einzelne Rechengebiet in einheitliche Gitterzellen von  $500 \times 500 \text{ m}^2$  Grundfläche aufgeteilt. Innerhalb jeder Gitterzelle „sieht“ das Modell nur eine mittlere Geländehöhe und die prozentualen Anteile von zehn verschiedenen Landnutzungskategorien (Wasser, Wiese, Acker, Wald, Bebauung, usw.). Alle räumlichen

Differenzierungen innerhalb einer Gitterzelle werden vom Modell nicht aufgelöst und deshalb in ihrer Wirkung auf die Strömungsverhältnisse auch nicht berücksichtigt. Dies ist für die Anwendung synthetischer Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken von großer Wichtigkeit und bedeutet z. B., dass ein Tal mindestens eine Breite von 500 m aufweisen muss, um näherungsweise auf dem Gitter abgebildet werden zu können. In der mittleren Abbildung ist das niedrige Gelände grün dargestellt, Höhenzüge sind braun und violett. Das nach Südosten verlaufende Tal wird von dem Modellraster gerade noch aufgelöst. Die Ortschaften heben sich auf dem Modellgitter als überwiegend bebaute Bereiche rot ab (rechts), landwirtschaftliche Flächen sind braun, Wälder in unterschiedlichen Grüntönen zu erkennen.



*Abbildung 7: Abbildung der realen topographischen Verhältnisse (links) auf mittlere Geländehöhen (Mitte) und Landnutzungen (rechts) in jeder Modell-Gitterzelle.*

## 2.2.4 Bedeckung

Der Bedeckungsgrad wird zur Bestimmung der Ausbreitungsklassen im Rahmen der statistischen Auswertung benötigt. Frei verfügbare Daten zum Bedeckungsgrad liegen jedoch in der geforderten räumlichen und zeitlichen Auflösung weder aus Modellrechnungen noch aus Messungen vor. Die Reanalysedaten enthalten zwar auch Bedeckungsgrade, sind jedoch auf andere Raumskalen bezogen und entsprechen deshalb nicht typischen Beobachtungsdaten, wie sie dem Bestimmungskonzept der Ausbreitungsklassen zugrunde liegen.

Der Bedeckungsgrad ist im Vergleich zu Tages- und Jahreszeit sowie zur Windgeschwindigkeit für die Bestimmung der Ausbreitungsklasse von geringerer (untergeordneter) Bedeutung, weil er die aus Zeit und Windgeschwindigkeit bestimmte Ausbreitungsklasse lediglich um eine Klasse verschieben kann. Daher sind Abweichungen der Bedeckungszeitreihe gegenüber den realen Verhältnissen akzeptabel, solange die mittleren Verhältnisse auch in ihrer Zeitabhängigkeit richtig wiedergegeben werden.

Im Vergleich zu Windrichtung und Windgeschwindigkeit weist der Bedeckungsgrad eine deutlich

höhere regionale Repräsentativität auf. Daher könnten durchaus zur Berechnung synthetischer AKS beobachtete Zeitreihen des Bedeckungsgrades aus der Region (soweit überhaupt verfügbar) herangezogen werden. Grundsätzlich bleibt damit aber eine Abhängigkeit von Messdaten bestehen, deren Verfügbarkeit in Zukunft nicht ausreichend gesichert ist. Deshalb wird in dem Berechnungsverfahren auf die Verwendung gemessener Bedeckungszeitreihen vollständig verzichtet.

Im langjährigen Mittel stellen sich in Deutschland, abgesehen von extremen Lagen, die mittleren Bedeckungsgrade als Funktion von Tages- und Jahreszeit relativ homogen dar und weisen typische U-förmige Verteilungen auf, wie in Abbildung 8 am Beispiel Hamburg und München gezeigt ist. Bei Verwendung solcher typischen Häufigkeitsverteilungen ist zwar nicht der aktuelle Bedeckungsgrad in der Cluster-Zeitreihe enthalten, jedoch kann jedem Zeitpunkt der Cluster-Zeitserie eine andere Häufigkeitsverteilung des Bedeckungsgrades zugeordnet werden. Daraus lässt sich später für jeden Zeitpunkt eine Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen ableiten.

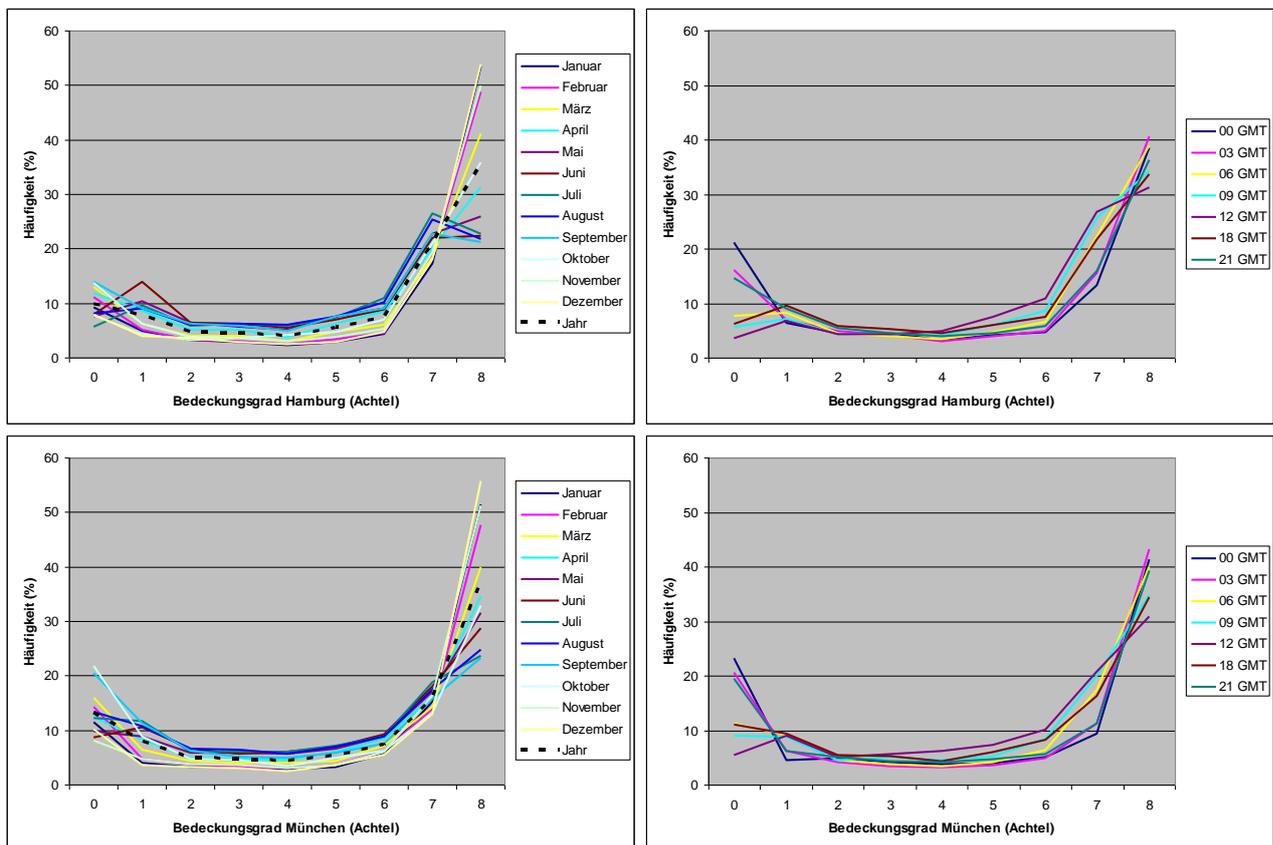


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade im Jahresverlauf (links) und Tagesverlauf (rechts) für Hamburg (oben, nach [16]) und München (unten, nach [17]).

Wegen der nur geringen räumlichen Variabilität werden je nach Lage des zu berechnenden Teilgebietes die Häufigkeitsverteilungen des Bedeckungsgrades entweder von Hamburg oder von München als Funktion von Tages- und Jahreszeit in der statistischen Auswertung verwendet.

## **2.3 Modell METRAS PC**

Basis für die synthetischen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken bilden Modellrechnungen mit dem prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodell METRAS PC<sup>2</sup>. Das Modell zählt zu der Klasse der mesoskaligen prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodelle. Es handelt sich um eine frei verfügbare Version des an der Universität Hamburg entwickelten wissenschaftlichen Modells METRAS [11], [12], [13].

METRAS PC basiert auf den grundlegenden atmosphärischen Zustandsgleichungen, wie z.B. den Bewegungsgleichungen, dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und der Kontinuitätsgleichung. Das Modellgebiet wird mit einem dreidimensionalen Maschennetz von Gitterpunkten überzogen (Arakawa-C-Gitter). An jedem dieser Gitterpunkte werden die Modellgleichungen numerisch gelöst. Die Randbedingungen sind numerisch so formuliert, dass sich die Strömung an allen Rändern des Modellgebietes frei einstellen kann. Damit werden Einflüsse der Ränder auf die Berechnungsergebnisse im Modellinnern minimiert.

In das Modell geht die großräumige meteorologische Situation über den Druckgradienten bzw. den geostrophischen Wind und die atmosphärischen Stabilität ein. Weitere Eingangsdaten sind die Geländehöhen und Flächennutzungen sowie die geographische Lage.

Im stationären Simulationsmodus berechnet METRAS PC dreidimensionale Windfelder, wie sie sich im dynamischen Gleichgewicht unter den topographischen Gegebenheiten (Geländere relief, Landnutzung) und den großräumigen meteorologischen Bedingungen einstellen (Abbildung 9). Im instationären Simulationsmodus werden zusätzlich die zeitabhängigen Energieflüsse am Boden berücksichtigt. In diesem Modus werden thermische Windsysteme, Temperatur und Feuchte sowie weitere diagnostisch abgeleitete Größen berechnet.

Aufgrund der umfassenden Modellphysik können mit METRAS PC alle auf der regionalen Skala relevanten Prozesse realitätsnah berechnet werden. Die horizontale räumliche Auflösung liegt typischerweise zwischen 50 m und 1 km, die typische vertikale Auflösung bei 20 m bodennah bis 1 km am Modelloberrand. Das Modellgitter kann in alle Raumrichtungen nicht-äquidistant gewählt werden.

Die Ergebnislösung des Modells ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert, z.B. in [14], [15].

---

<sup>2</sup> METRAS PC wurde gemeinsam von Dr. K.H. Schlünzen, S. Dierer, H. Pankus (Meteorologisches Institut, Universität Hamburg) und Dr. K. Bigalke (METCON Umweltmeteorologische Beratung, Pinneberg) im Auftrag des Umweltbundesamtes im FE Projekt 104 04 354 aufbauend auf dem Modell METRAS entwickelt.“

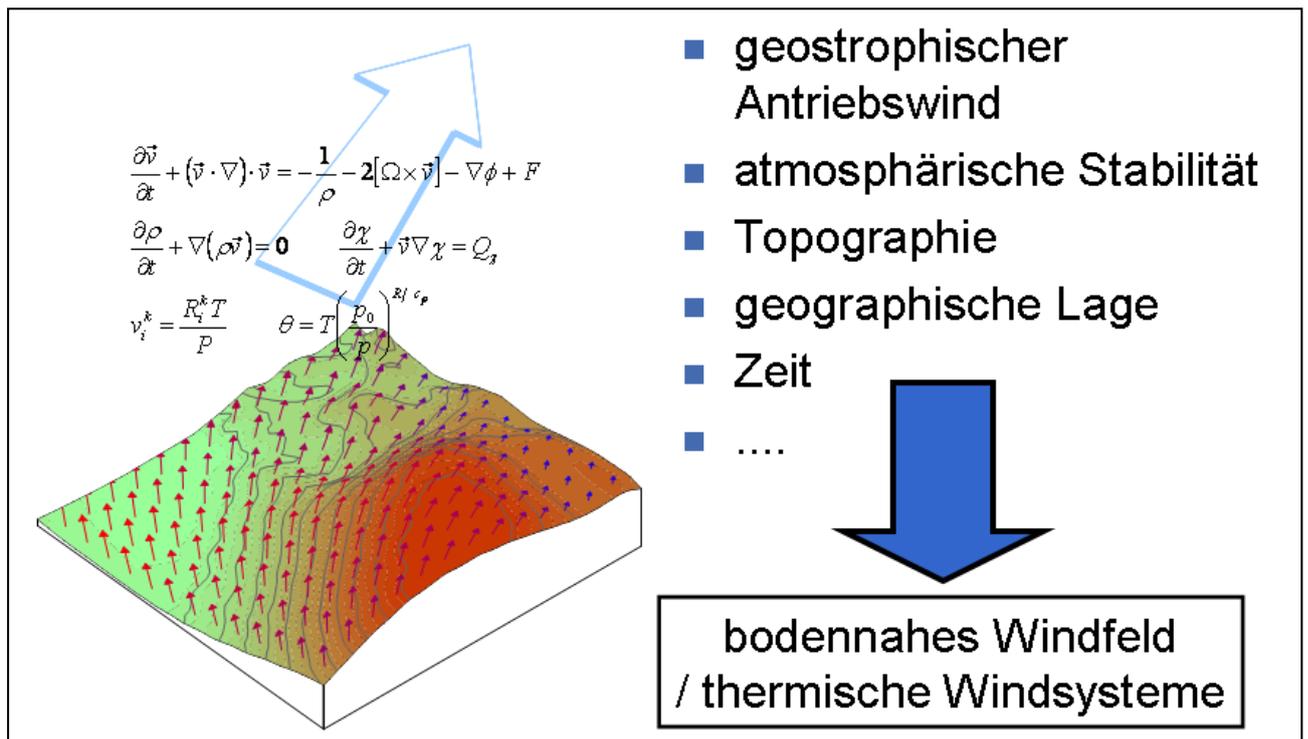


Abbildung 9: Auf Basis der physikalischen Gesetze für die Atmosphäre und Daten zum Modellgebiet und der großräumigen meteorologischen Situation berechnet METRAS PC die bodennahen Windsysteme.

## 2.4 Prognostische Windfeldberechnungen

### 2.4.1 Testrechnungen zur Modellgebietsgröße

Bei numerischen Berechnungen sind die seitlichen Ränder eines Modellgebietes ebenso wie der obere Rand künstliche Ränder ohne Entsprechung in der Natur. Obwohl die seitlichen Randbedingungen in METRAS PC als sogenannte „offene Ränder“ implementiert sind und sich die Strömungsverhältnisse dort weitgehend frei einstellen können, sollten Modellergebnisse in Randnähe nicht interpretiert werden, da sie aufgrund numerischer Einflüsse unrealistische Verhältnisse widerspiegeln können. Hinzu kommt, dass die realen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet auch von topographischen Einflüssen außerhalb über mehr oder weniger große Entfernungen beeinflusst sein können. Diese Einflüsse können von METRAS PC nur berücksichtigt werden, wenn die entsprechenden Geländestrukturen im Modellgebiet enthalten sind.

Trotz heutzutage sehr leistungsfähiger Rechner ist bei einer Auflösung von 500 x 500 m<sup>2</sup> die Anzahl der Gitterpunkte, die mit einem vertretbaren Rechenaufwand berechnet werden können, beschränkt. Unter anderem aus diesem Grund ist es notwendig, die Berechnungen der synthetischen AKS für Deutschland auf einzelne Teilgebiete aufzuteilen. Die Modellgitter jedes einzelnen Teilgebietes sind horizontal äquidistant mit einer Gitterweite von 500 m. Der

Modelloberrand liegt in ca. 12 km Höhe. Die vertikale Gitterauflösung reicht von 20 m bodennah bis zu 1 km am Modelloberrand. Allerdings ist das eigentliche Rechengebiet deutlich größer zu wählen, da die Einflüsse topographischer Strukturen außerhalb des Teilgebietes auf das Strömungsfeld innerhalb des Teilgebietes möglichst realistisch erfasst werden müssen. Dies erfordert für jedes einzelne Teilgebiet vorab Testrechnungen zur Festlegung der erforderlichen Rechengebietsgröße. Dabei wird anhand von unterschiedlich großen Rechengebieten und den individuellen meteorologischen Initialisierungsdaten für das jeweilige Teilgebiet für unterschiedliche Cluster untersucht, welches Rechengebiet für eine möglichst realitätsnahe Darstellung der Verhältnisse im Untersuchungsgebiet geeignet ist.

#### **2.4.2 Produktionsrechnungen**

Für jedes der 120 Cluster eines jeden Teilgebietes wird eine Modellrechnung unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse des Geländes (Rauigkeit, Relief) und der großräumigen Anströmung durchgeführt. Die Simulationszeit wird so gewählt, dass sich näherungsweise stationäre Strömungsverhältnisse im Modellgebiet einstellen. Abhängig von der atmosphärischen Schichtung sowie Anströmrichtung und -geschwindigkeit sind zum Einstellen quasistationärer Verhältnisse im Modellgebiet häufig Simulationszeiträume von mehreren Stunden nötig. In die Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken gehen jeweils halbstündig gemittelte Windfelder zum Ende des Simulationszeitraums ein. Über das Erreichen näherungsweise stationärer Verhältnisse wird aus fachlicher Erfahrung anhand der Visualisierung der simulierten Windfelder in ihrem zeitlichen und räumlichen Verlauf entschieden.

Die Clusterdaten unterscheiden sich für jedes Teilgebiet, da die Reanalyseedaten räumlich variieren und von dem globalen 2,5°-Gitter auf jedes Teilgebiet interpoliert werden. Jedes der 120 Cluster je Teilgebiet enthält einen charakteristischen Antriebssatz, bestehend aus geostrophischen Windkomponenten und potentielltem Temperaturgradienten innerhalb der Grenzschicht. Oberhalb der Grenzschicht, die bei ca. 1500 m über Grund angesetzt wird, bis zum Modelloberrand wird immer der potentielle Temperaturgradient der Standardatmosphäre (0.35 K/100m) angesetzt.

Ein Beispiel eines mit METRAS PC berechneten bodennahen Windfeldes ist in der Abbildung 10 gegeben. Es handelt sich hier um den Großraum Stuttgart. Gezeigt ist eine Anströmung mit einem schwachen Höhenwind aus östlichen Richtungen und stabil geschichteter Atmosphäre. Es ist deutlich zu sehen, dass der bodennahe Wind stark durch das Gelände gelenkt wird. Im südöstlichen Modellgebiet ist beispielsweise die Kanalisierung des Windes durch das Neckartal deutlich zu erkennen. Hier, wie auch in einigen anderen Gebieten innerhalb des Modellgebietes, stellt sich sogar ein dem Höhenwind entgegen gerichteter bodennaher Wind ein. Das Beispiel zeigt, dass mit METRAS typische Strömungskonfigurationen wie durch Topographie bedingte Kanalisierungen, Nachlaufzonen mit Rückströmgebieten in Lee von ausgeprägten Topographien etc. realistisch wiedergegeben werden.

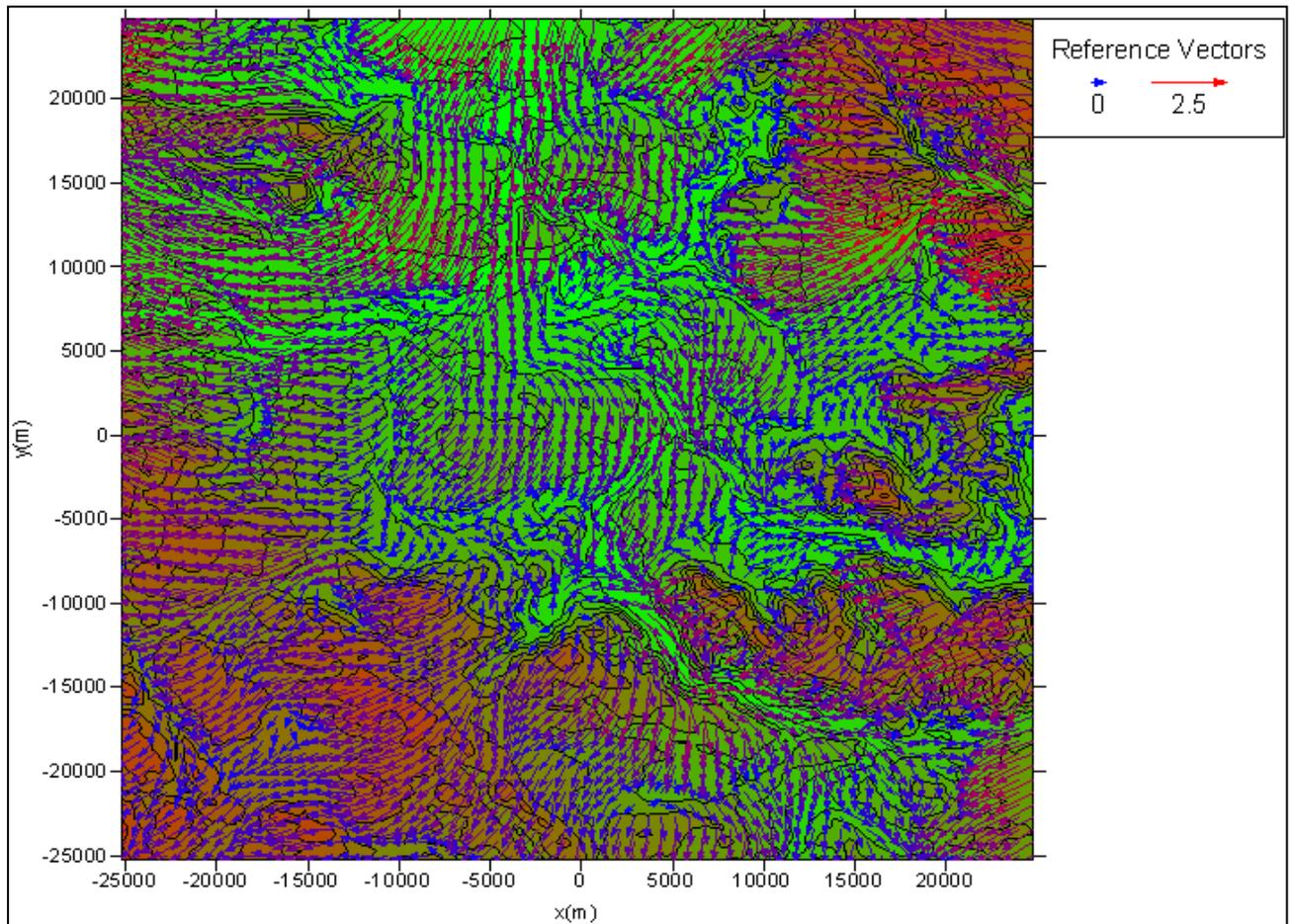


Abbildung 10: Beispiel für ein mit METRAS PC berechnetes bodennahe Windfeld im Großraum Stuttgart bei stabil geschichteter Atmosphäre und schwachem östlichen Höhenwind.

Alle in der Abbildung 10 sichtbaren Effekte auf das bodennahe Windfeld sind rein dynamischer Natur, d.h. auf die Wirkung des Geländereiefs und die unterschiedliche Bodenrauigkeit durch Bewuchs und Bebauung zurückzuführen. Neben diesen dynamischen Strömungseinflüssen werden in den synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken auch nächtliche Kaltluftwindssysteme durch eine beschränkte Anzahl instationärer, thermodynamischer Modellrechnungen berücksichtigt. Hierzu werden je Teilgebiet eine Modellrechnung ohne einen großräumigen Wind und zwölf Rechnungen mit einem schwachen großräumigen Wind aus den Richtungen 0°, 30°, 60° usw. bis 330° durchgeführt. Alle Rechnungen werden für einen 1. August um 18<sup>00</sup> WOZ unter Annahme einer bis 1800 m Höhe durchmischten (neutralen) Grenzschicht und einer darüber liegenden Standardatmosphäre gestartet und über 12 Stunden Simulationszeit durchgeführt. Die quasi-stationären thermodynamischen Windsysteme bilden sich typischerweise in den späten Abendstunden aus und halten dann für mehrere Stunden an. In die synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken gehen jeweils Strömungsfelder aus diesem quasi-stationären Zustand ein.

## **2.5 Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken**

Die synthetischen Windstatistiken werden aus den dynamischen und thermodynamischen Modellrechnungen nach dem bereits erwähnten *Cluster-Zeitserien-Verfahren* wie nachfolgend beschrieben abgeleitet.

Aus dem jeweils betrachteten Cluster der stationären Modellläufe geht die am Gitterpunkt in ca. 10 m ü. Gr.<sup>3</sup> berechnete Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gewichtet mit der Clusterhäufigkeit, in die synthetische Statistik ein. Zu dem berechneten Wind werden die nach TA Luft zugehörigen Richtungs- und Geschwindigkeitsklassen bestimmt.

In schwachwindigen Nächten bilden sich lokale Kaltluftsysteme aus. Diese können, bezogen auf das gesamte Jahr, über bis zu 8 Nachtstunden dominant sein. Unterhalb eines Schwellenwertes der im Cluster berechneten Windgeschwindigkeit wird davon ausgegangen, dass ein lokales Kaltluftsystem vorliegt. In diesem Fall wird der mit dem stationären Modellauf berechnete Wind durch die Ergebnisse der thermodynamischen Rechnungen ersetzt. Die Ersetzung erfolgt jeweils zur Hälfte durch das Ergebnis der Rechnung ohne großräumigen Wind und zur Hälfte mit dem Ergebnis der Rechnung mit großräumigem Wind (1 m/s), deren großräumige Windrichtung der großräumigen Windrichtung des gerade betrachteten Clusters entspricht.

Die Cluster-Zeitserie wird dann nach allen Zeitpunkten durchsucht, zu denen das aktuelle Cluster auftritt. Zu jedem Auftreten wird aus Zeitpunkt und Windgeschwindigkeit die zu jedem Bedeckungsgrad zwischen 0/8 und 8/8 gehörende Ausbreitungsklasse festgelegt. Damit kann die Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade zum aktuellen Zeitpunkt in eine Häufigkeitsverteilung (bzw. eine Wahrscheinlichkeitsverteilung) der Ausbreitungsklassen umgerechnet werden. Diese Häufigkeitsverteilungen werden über alle Zeitpunkte aufsummiert, zu denen das aktuelle Cluster auftritt. Die daraus resultierende Häufigkeitsverteilung wird in der Summe auf 1 normiert und mit der langjährigen Aufttrittshäufigkeit des aktuellen Clusters gewichtet. Als Zwischenergebnis liegt damit der Beitrag des aktuellen Clusters zu allen Ausbreitungsklassen innerhalb der zugehörigen Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsklasse vor.

Dieser Prozess wird für alle Cluster durchlaufen und führt nach Wichtung mit den Clusterhäufigkeiten zu der gewünschten synthetischen Ausbreitungsklassenstatistik am Gitterpunkt.

Jede der 133 Modellrechnungen resultiert an einem bodennahen Gitterpunkt in genau einer Windrichtung und Windgeschwindigkeit mit der Aufttrittshäufigkeit des dazugehörigen Antriebsclusters. Bei der Berechnung der bodennahen Windstatistiken an jedem Gitterpunkt bleiben etliche der 36 Windrichtungs- und 9 Windgeschwindigkeitsklassen nach TA Luft somit unbesetzt. Dabei handelt es sich zwar überwiegend um Klassen hoher Windgeschwindigkeiten in

---

<sup>3</sup> Der vom Modell berechnete Wind gilt etwa in 10 m über der Verdrängungshöhe, die von der Rauigkeit der Landnutzung abhängt.

selteneren Richtungssektoren, aber auch in häufiger belegten Sektoren bleiben gelegentlich Lücken bestehen. Das Modell liefert bei einer gegebenen großräumigen meteorologischen Situation einen eindeutigen bodennahen Wind. Im Gegensatz zum Modell kommt es dagegen in der Natur auch unter dynamisch dominierten atmosphärischen Verhältnissen und einer großskalig stationären Anströmsituation bodennah zu kleinen Variationen im Windfeld.

Das natürliche Mäandern der Windrichtung wird in den synthetisch gewonnenen Statistiken durch Anwendung eines 3-Punkt-Filters über die Windrichtungssektoren angenähert. Gemessene Windgeschwindigkeitsverteilungen lassen sich in der Regel gut an eine 2-parametrische Weibullverteilung annähern. Die aus den diskreten Belegungen der Geschwindigkeitsklassen gewonnenen Häufigkeiten werden deshalb anschließend über eine Weibullverteilung geglättet. Anschließend werden die Häufigkeiten innerhalb der Windgeschwindigkeitsklassen aus der analytischen Weibullverteilung neu berechnet. Die Bestimmung der Weibullparameter und Neuberechnung der Häufigkeitsverteilung erfolgt separat für jeden Richtungssektor.

### **3 Voruntersuchungen**

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten zu dem Cluster-Zeitserien-Verfahren wurde der Einfluss einer Vielzahl von Parametern und Eingangsdaten auf die Qualität der berechneten Wind- und Ausbreitungsstatistiken untersucht. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass mit Modell-Antriebsdaten auf Basis der NCAR-Reanalysen realitätsnähere Windrichtungsverteilungen erzeugt werden können als auf Basis von Daten der Radiosondenaufstiege. Aus der Vielzahl der Voruntersuchungen wird nachfolgend der Einfluss von zwei wichtigen Parametern exemplarisch dokumentiert, und zwar die Anzahl der Cluster und deren Verteilung im Parameterraum sowie die räumliche Auflösung der Modellrechnungen. Wegen des ausgesprochen hohen Modellieraufwandes sind beide Parameter kritisch hinsichtlich der notwendigen Rechenressourcen, aber auch hinsichtlich des Arbeitsaufwands für eine sorgfältige Einzelprüfung jeder Modellrechnung.

#### **3.1 Anzahl und Verteilung der Cluster**

Die Clusteranalyse wird zu dem Zweck durchgeführt, die enorm hohe Anzahl an meteorologischen Einzelsituationen eines 10-Jahres-Zeitraums auf eine überschaubare Zahl von repräsentativen Situationen zurückzuführen, die jeweils einzeln mit METRAS PC simuliert werden können. Die resultierenden Cluster sind nicht gleichmäßig im Parameterraum der Antriebsdaten (Wind, Schichtung) verteilt, sondern häufen sich in solchen Regionen, die im langjährigen Mittel besonders häufig auftreten. Dort sind auch die Differenzen in den Antriebsdaten der Cluster vergleichsweise gering. Dagegen werden Parameterkombinationen, die in 10 Jahren nur selten auftreten, von nur wenigen Clustern repräsentiert. Diese fassen wiederum sehr viele Einzelsituationen mit teilweise recht unterschiedlichen Winden und Stabilitäten zusammen. In der Abbildung 6 zeigt sich dieser Sachverhalt in einer Ballung von Clustern im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich in den beiden rechten Quadranten, während der Abstand zwischen den Clustern bei hohen Windgeschwindigkeiten recht groß wird. Außerdem gibt es deutlich weniger Cluster mit Nordostwind (entspricht dem Quadranten links unten) als mit Südwestwind (Quadrant rechts oben).

Je mehr Modellrechnungen den synthetischen Daten zugrunde liegen, umso mehr Feinheiten in den charakteristischen bodennahen Windverhältnissen werden tendenziell aufgelöst werden können. In dem aktuellen Berechnungsverfahren werden je Teilgebiet dynamische Modellrechnungen für 120 Cluster plus Rechnungen für thermodynamische Windsysteme durchgeführt. Die Frage ist, ob mit einer höheren Anzahl an Clustern bzw. einer gleichmäßigeren Verteilung über den Parameterraum von Wind und Stabilität ein nennenswerter Qualitätszuwachs oder überhaupt wesentlich andere Ergebnisse erzielt werden können.

Zur Untersuchung dieser Frage wurde für ein Teilgebiet in Mittelfranken eine alternative

Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken auf Basis von insgesamt 269 stationären und 13 instationären Modellrechnungen vorgenommen. Das ist mehr als eine Verdoppelung der Anzahl stationärer Modellrechnungen (224%) gegenüber dem Standardverfahren.

Die Verteilung der Antriebsdaten erfolgte gleichmäßig über den Parameterraum:

- 24 Windrichtungssektoren zu 15°
- Geschwindigkeitsklassen: 2 / 4,5 / 8 / 13 / 20 m/s
- Stabilitätsklassen: 0,0020 / 0,0045 / 0,0070 / 0,0095 K/m

Weist man jeden Zeitpunkt der 10-jährigen NCAR-Reanalyse-Zeitreihe einer dieser Klassen zu, so treten nur 418 der insgesamt 480 Klassen tatsächlich in diesem Zeitraum auf. Viele Klassen kommen aber nur wenige Male innerhalb der 10 Jahre vor und können deshalb keinen nennenswerten Beitrag zur Windstatistik liefern. Sortiert man die Klassen nach Auftretenshäufigkeiten und bildet die Häufigkeitssummen des Auftretens, so leisten 149 Klassen in der Summe nur einen Beitrag von weniger als 5 %, die verbleibenden 269 Klassen aber 95 %. Nur diese werden tatsächlich mit METRAS PC berechnet. Die anderen Klassen werden den nächstgelegenen berechneten Klassen zugeschlagen.

In Abbildung 11 bis Abbildung 14 sind die mit beiden Verfahren berechneten Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse für vier Orte einander gegenübergestellt. Die Orte repräsentieren vier charakteristische Windverteilungen: Breites Maximum aus West bis Südwest, schmales Maximum aus Südwest, Maximum aus Nordwest mit breiter Verteilung über südwestliche Richtungen sowie ein zweigipfliges Maximum aus Süd und West.<sup>4</sup>

An allen Orten werden mit beiden Verfahren sehr ähnliche Windrosen berechnet. Die Differenzen in den Häufigkeiten einzelner Richtungssektoren sind überall geringer als 1 %. Der wesentliche Unterschied in den Windrichtungsverteilungen besteht an allen Orten in einem kleinen Nebenmaximum aus NNE bei Berechnung mit 120 Clustern. Offensichtlich werden bodennahe Winde aus NNE in diesem Gebiet nur durch wenige Cluster repräsentiert. Wird dagegen mit 269 Clustern gerechnet, so wird dieser Sektor etwas besser aufgelöst, was sich in einer etwas gleichmäßigeren Verteilung über die nordnordöstlichen Windrichtungen niederschlägt. Ein ähnlicher Effekt deutet sich bei südlichen bzw. südöstlichen Windrichtungen an.

Auch die Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse sind zwischen beiden Berechnungsverfahren sehr ähnlich. Die Häufigkeiten der Ausbreitungsklassen unterscheiden sich um nicht mehr als 2 %. In den Windgeschwindigkeitsklassen gibt es teilweise etwas größere Differenzen, vorwiegend allerdings in den Klassen niedriger Geschwindigkeiten.

---

<sup>4</sup> Die dargestellten Verteilungen sind im Rahmen der Voruntersuchungen entstanden und entsprechen nicht den Daten der aktuellen SynAKS Version 2.05.

Gerade die ersten drei Klassen liegen nach der TA Luft-Klassifizierung sehr dicht beieinander und decken den Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 2,3 m/s ab. Insofern können bereits geringe Verschiebungen in der Windgeschwindigkeit zu merkbaren Differenzen in den Anteilen der einzelnen Klassen führen. Dennoch liefern beide Berechnungsverfahren in der Regel eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen von wenigen Prozentpunkten.

Insgesamt können die Differenzen zwischen den synthetischen Statistiken auf Basis beider Berechnungsverfahren als so gering bewertet werden, dass der mehr als doppelt so hohe Rechenaufwand für die zusätzlichen Cluster hierzu in keinem Verhältnis steht. Diese Bewertung gilt auch unabhängig davon, mit welchem der beiden Verfahren die tatsächlich vorliegenden Verhältnisse besser reproduziert werden können. Wie in einem späteren Kapitel dieser Dokumentation erläutert wird, ist ein direkter Vergleich zwischen synthetischen und gemessenen Daten in der Regel nicht möglich. Angesichts der geringen Differenzen zwischen beiden Berechnungsverfahren lässt sich deshalb die Frage nach der „besseren“ synthetischen Statistik ohnehin nicht beantworten.



Abbildung 11: Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4402500 / 5485500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts).

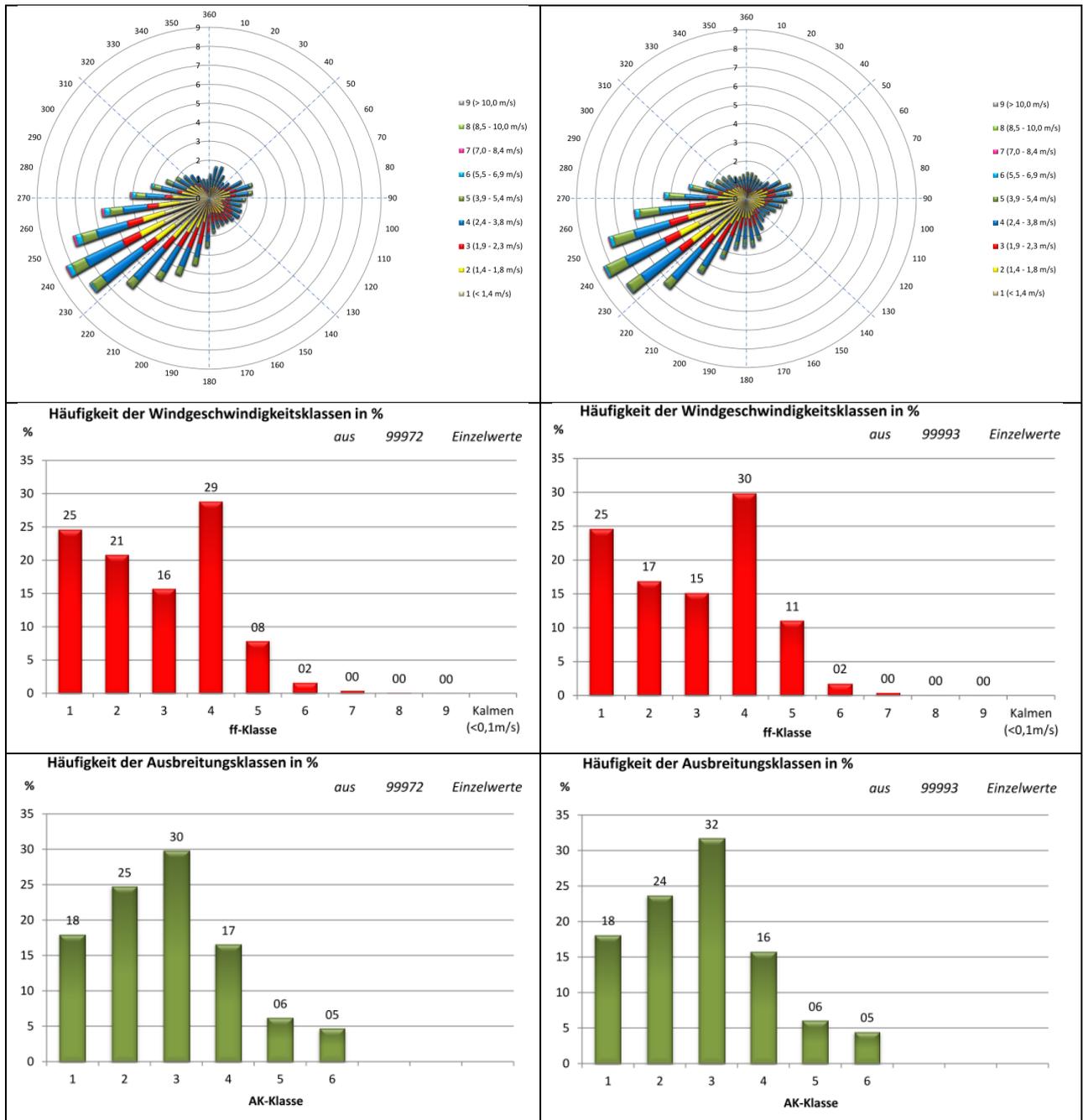


Abbildung 12: Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4404500 / 5482500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts).

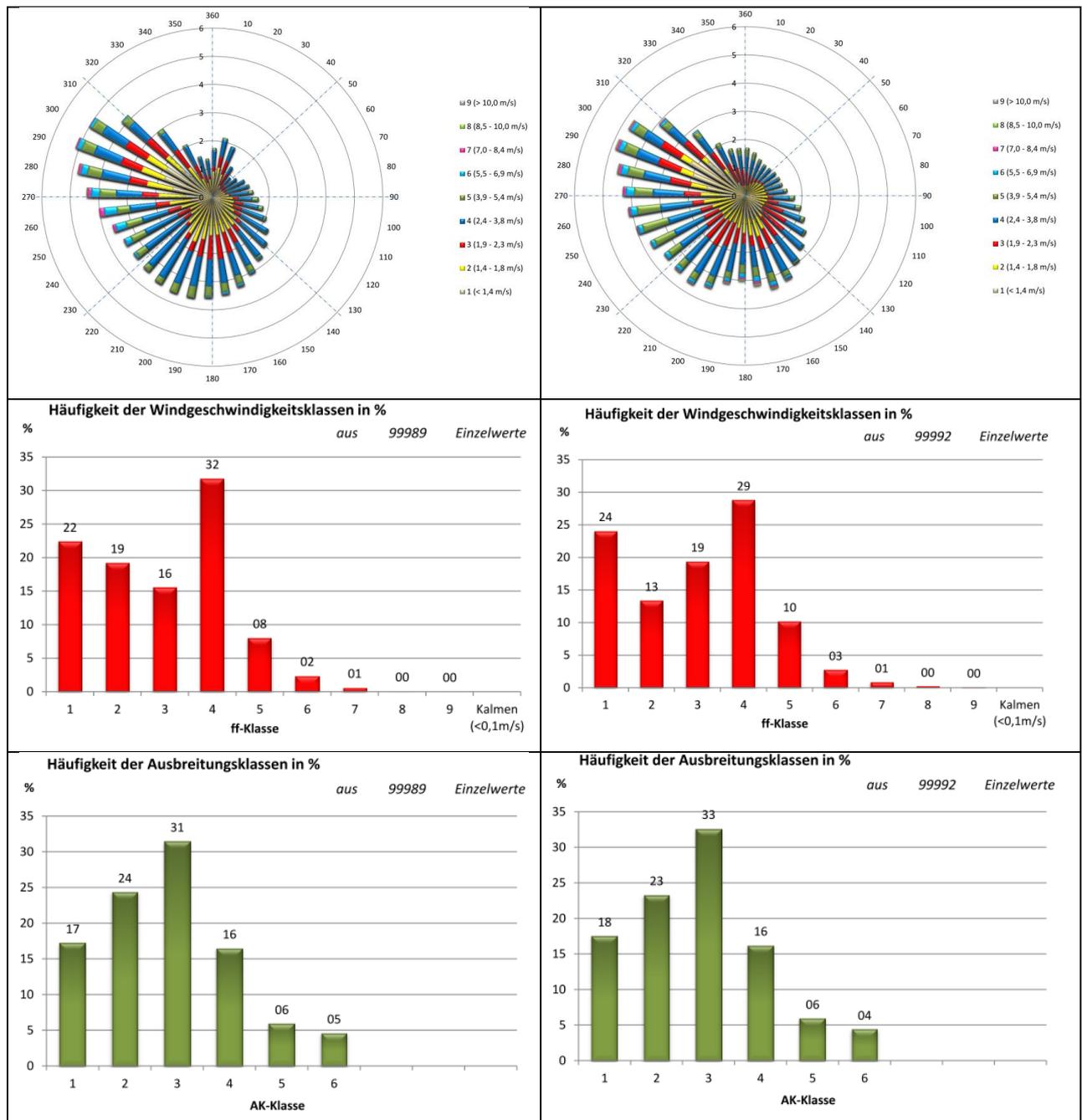


Abbildung 13: Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4405000 / 5485500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts).



Abbildung 14: Windrosen und Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse an der GK-Koordinate 4419500 / 5442500, berechnet auf Basis von 120 Clustern (links) und 269 gleichverteilten Clustern (rechts).

## **3.2 Gitterauflösung**

Je höher die räumliche Auflösung der Modellrechnungen gewählt wird, desto besser werden die topographischen Strukturen des Geländes aufgelöst und können sich entsprechend auf die berechneten synthetischen Windstatistiken auswirken. Insofern wäre grundsätzlich eine möglichst hohe Auflösung wünschenswert. Andererseits nimmt die Rechenzeit mit der Auflösung überproportional zu, so dass ein Kompromiss zwischen verfügbaren Rechenressourcen und räumlicher Auflösung gefunden werden muss. Eine beliebig hohe Auflösung ist aber auch aus einem anderen Grund nicht vorteilhaft: Für Ausbreitungsrechnungen werden meist die mittleren Antriebsbedingungen für das Untersuchungsgebiet benötigt. Die subskaligen Variationen der Ausbreitungsverhältnisse werden dann im Rahmen der Ausbreitungsrechnung mit einem geeigneten Strömungsmodell aufgeprägt, beispielsweise mit dem in AUSTAL2000 integrierten diagnostischen Windfeldmodell. Aus diesen Gründen ist für die synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken eine räumliche Auflösung von 500 m gewählt worden, da dies der typischen Größenordnung von Untersuchungsgebieten im Nahfeld niedriger bis mittelhoher Quellen entspricht.

Um die unterschiedliche räumliche Repräsentativität von exponierten Messungen und synthetischen Daten abschätzen zu können, wurde eine Sonderuntersuchung durchgeführt. Für ein kleines Teilgebiet der Bayerischen Alpen wurden synthetische Windstatistiken in einer Auflösung von 150 m neu berechnet und mit den synthetischen Daten in 500 m Auflösung sowie mit Messungen von mehreren Stationen verglichen. Die Ergebnisse für die DWD-Station auf dem Wendelstein werden nachfolgend ausführlich erläutert. Ergebnisse für andere Stationen können nur anonymisiert anhand der Windgeschwindigkeiten dargestellt werden.

Die Station des Deutschen Wetterdienstes liegt auf der Kuppe des Wendelsteins (Abbildung 15). Gemessen wird eine Windgeschwindigkeit von 6,6 m/s im Mittel über den Zeitraum 2001 - 2010 bei überwiegend westlichen Winden.

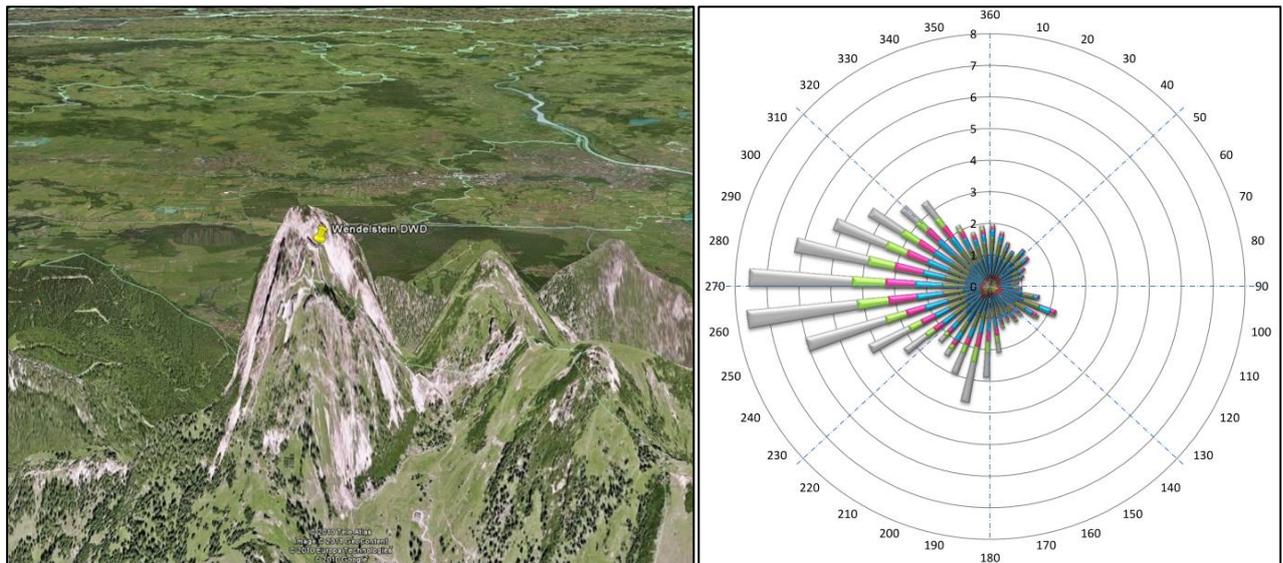


Abbildung 15: Standort der DWD-Station Wendelstein (links: Bildquelle © 2012 Google Inc. Alle Rechte vorbehalten. Google Earth™ ist eine Marke von Google Inc.) und gemessene Windrose 2001-2010 (rechts).

Die synthetischen Windrosen in 500 m Auflösung zeigen gut die Umströmung des Wendelstein-Massivs (Abbildung 16). Die Windgeschwindigkeiten liegen mit maximal 2,6 m/s aber weit unterhalb der Messung auf dem Gipfel. Die der Station nächstgelegene Rose weist ein Hauptmaximum aus Süd sowie eine relativ gleichmäßige Verteilung anderer Windrichtungen auf.

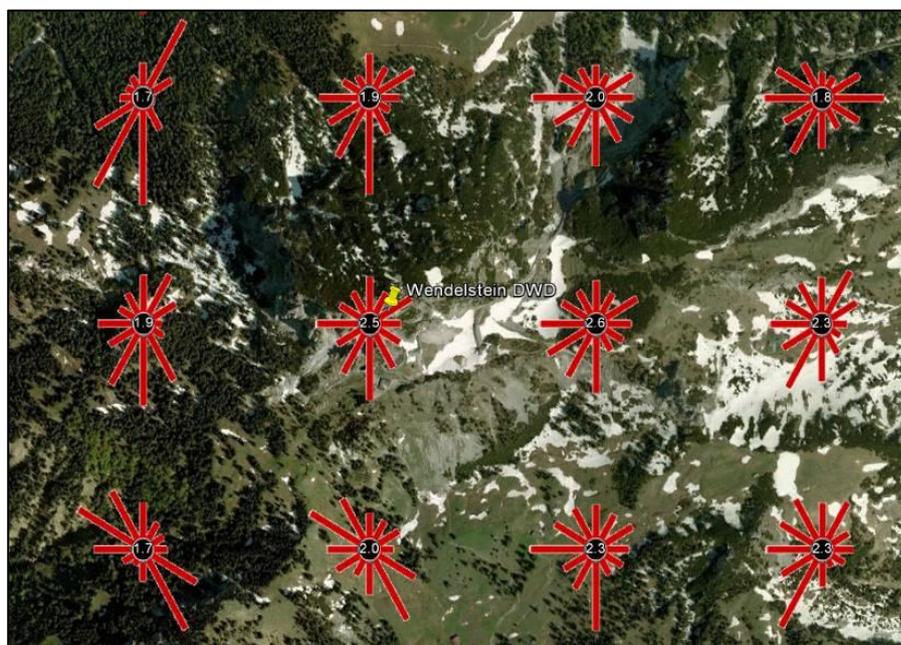


Abbildung 16: Synthetische Windrosen in 500 m Auflösung im Bereich des Wendelstein-Massivs (Bildquelle © 2012 Google Inc. Alle Rechte vorbehalten. Google Earth™ ist eine Marke von Google Inc.).

Werden die synthetischen Windrosen auf einem 150 m Raster berechnet, tritt die Umströmung des

Wendelsteins noch deutlicher hervor (Abbildung 17). Die Hauptwindrichtung auf dem Gipfel dreht auf westliche Richtungen und nähert sich der gemessenen Verteilung recht gut an. Vor allem aber steigt die Windgeschwindigkeit im Jahresmittel auf nun 5,1 m/s an. Das ist etwa eine Verdoppelung gegenüber der Geschwindigkeit, die auf dem 500 m Raster bestimmt wurde, und liegt nur noch gut 20 % unter dem gemessenen Wert.



Abbildung 17: Synthetische Windrosen in 150 m Auflösung im Bereich des Wendelstein-Massivs (Bildquelle © 2012 Google Inc. Alle Rechte vorbehalten. Google Earth™ ist eine Marke von Google Inc.).

Es kann deshalb erwartet werden, dass sich mit einer weiteren Verfeinerung der Auflösung die synthetische Windrose und die Windgeschwindigkeit noch weiter der Messung annähern würde. Andererseits lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass die Messung auf dem Wendelstein bestenfalls für einen Umkreis von deutlich weniger als 75 m um die Station repräsentativ ist!

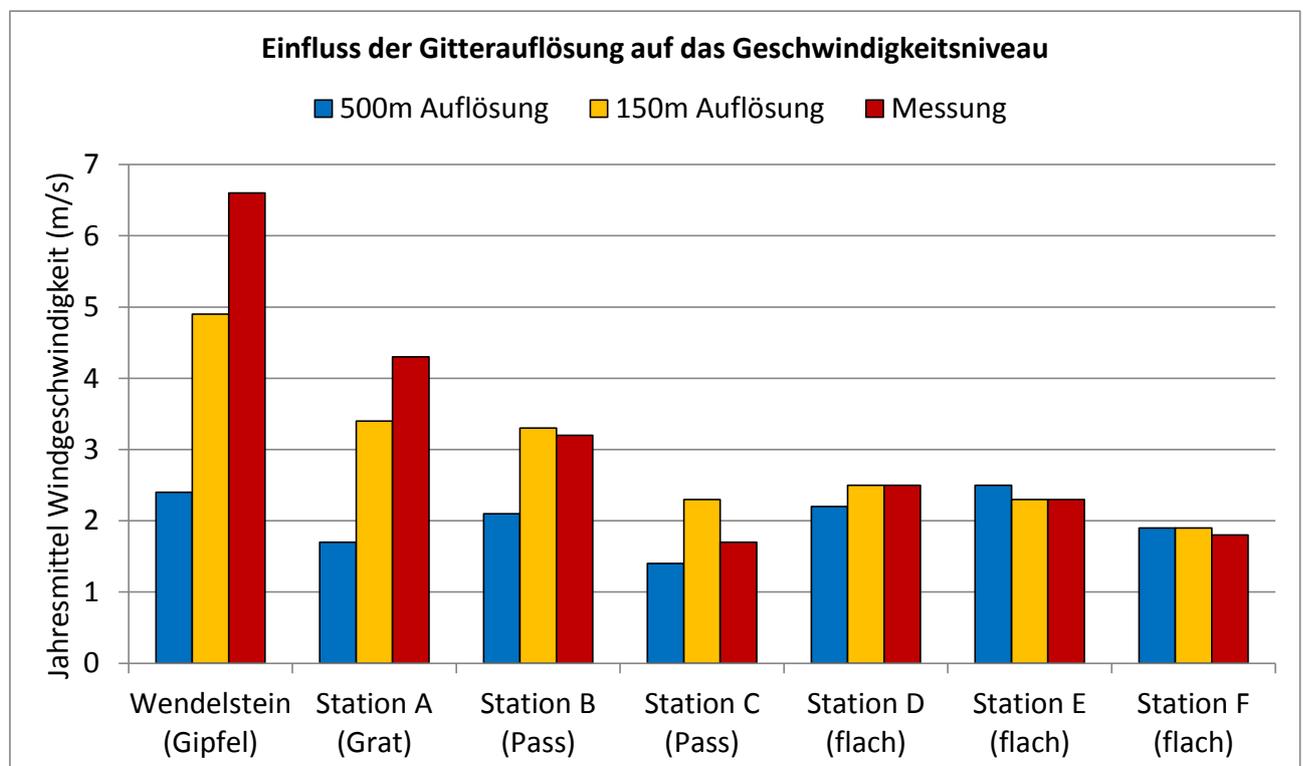
Die hohe gemessene Windgeschwindigkeit lässt sich somit eindeutig auf einen starken Speed-Up-Effekt über der Kuppe des Wendelsteins zurückführen. Des Weiteren deuten die Modellergebnisse darauf hin, dass die üblicherweise an Bergstationen hohen gemessenen Windgeschwindigkeiten zu einem wesentlichen Anteil auf lokale Speed-Up-Effekte zurückzuführen sind und weniger stark als allgemein angenommen auf die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe über NN.

In der Abbildung 18 sind für den Wendelstein sowie weitere 6 anonymisierte Messstationen die im

langjährigen Mittel gemessenen Windgeschwindigkeiten sowie die mit 500 m und 150 m Auflösung berechneten synthetischen Windgeschwindigkeiten aufgetragen. Die Station A liegt auf einem langgestreckten Grat in rund 1.600 m über NN. Hier zeigen sich ganz ähnliche Zusammenhänge wie am Wendelstein. Mit 500 m Auflösung liegt die synthetische Windgeschwindigkeit mit 1,7 m/s nur bei 40 % des gemessenen Wertes. Wird die Auflösung auf 150 m erhöht, so steigt die berechnete Windgeschwindigkeit auf 80 % des Messwertes an. Es kann also davon ausgegangen werden, dass auch diese Messstation nur auf einer Skala von einigen 10 Metern repräsentativ ist und einem sehr starken Speed-Up-Effekt unterliegt.

Die Stationen B und C liegen in Sattelage zwischen beidseitig um mehrere hundert Meter höheren Bergen. An der ersten Station wird mit Zunahme der räumlichen Auflösung die ursprüngliche Unterschätzung der gemessenen Windgeschwindigkeit von 35 % nahezu ausgeglichen. An der zweiten Station wird die Messung dagegen im ersten Fall um ca. 20 % unterschätzt, bei feinerer Auflösung um 1/3 überschätzt.

Die verbleibenden 3 Stationen liegen in flachem Gelände. Hier spielt die räumliche Auflösung der Berechnungen eine untergeordnete Rolle. Bei den Stationen D und E werden mit 500 m Auflösung die Messwerte um rund 10 % unter- bzw. überschätzt und mit 150 m Auflösung exakt reproduziert. An der Station F ändert sich die synthetisch gewonnene Windgeschwindigkeit nicht mit der Auflösung.



*Abbildung 18: Gemessenes und berechnetes Jahresmittel der Windgeschwindigkeit an Messstationen unterschiedlicher orographischer Exposition.*

Als Fazit der Sonderuntersuchung kann festgehalten werden:

- So genannte „frei gelegene“ Messstationen in topographisch strukturiertem Gelände können Repräsentativitätsradien von nur wenigen Dekametern aufweisen.
- Die Qualität synthetischer Daten mit einem festen Repräsentativitätsbereich von  $500 \times 500 \text{ m}^2$  lässt sich nicht aus dem Vergleich mit Messstationen deutlich abweichender Repräsentativität ableiten.
- Mit zunehmender räumlicher Auflösung geben synthetische Daten auch solche Messungen wieder, die nur lokal repräsentativ sind.

## 4 Qualitätssicherung

Alle synthetischen AKS werden mit geprüfter, einheitlicher Verfahrensqualität erstellt. Sie beruhen auf einheitlicher Datenbasis, gleichem Berechnungsverfahren und werden ohne individuelle Anpassungen an die einzeln berechneten Teilgebiete erstellt. Dies wird durch einen internen Arbeitsleitfaden sichergestellt, der rund 200 einzelne Arbeitsschritte von der Vorbereitung eines Teilgebietes bis zur Freigabe der SynAKS dieses Gebietes beschreibt und deren Abarbeitung von den jeweiligen Bearbeitern zu dokumentieren ist.

In den nachfolgenden Abschnitten werden allgemeine Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Windfeldmodellierung (Kapitel 4.1), die Maßnahmen zur Qualitätssicherung im laufenden Berechnungsverfahren je Teilgebiet (Kapitel 4.2 und 4.3), die Qualitätskontrolle unter Berücksichtigung der räumlichen Repräsentativität der SynAKS (Kapitel 4.4) sowie Qualitätssicherungsmaßnahmen vor Weitergabe einzelner Datensätze (Kapitel 4.5 und 4.6) zusammenfassend dokumentiert.

### 4.1 Windfeldmodellierung

Die Ergebnisgüte des Modells METRAS ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert, so z.B. in [14] und [15]. Es erfüllt bereits die nach der in Arbeit befindlichen VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7 (Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige nichthydrostatische Windfeldmodelle) bzgl. der Qualitätssicherung geplanten Anforderungen hinsichtlich Zugänglichkeit, Vollständigkeit, Evaluierung, Nachweis der Ergebnisgüte und Tests durch Dritte.

- **Verfügbarkeit:**

Das Modell METRAS-PC ist gegen eine Aufwandsentschädigung bei der Universität Hamburg frei verfügbar.

- **Vollständigkeit:**

Das Modell ist vollständig bzgl. der notwendigen Modelleigenschaften für die Mesoskalen Beta und Gamma. Für eine genaue Modellbeschreibung wird auf die Literatur verwiesen [11], [12], [14], [18].

- **Evaluierung:**

Das Modell METRAS-PC erfüllt bereits heute die nach der geplanten VDI-Richtlinie VDI 3783, Blatt 7 zu erwartenden Anforderungen [18].

- **Nachweis der Ergebnisgüte:**

Die Ergebnisgüte des Modells ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert, z.B. [15], [19], [20].

- **Test durch Dritte:**

Das Modell ist nicht nur durch die Modellentwickler und die Autoren ausgiebig getestet

worden, sondern wird darüber hinaus bei über 20 externen Institutionen eingesetzt.

Über diese Anforderungen hinaus werden weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung getroffen:

1. Das Modell METRAS-PC wird mit charakteristischen Klassen des großskaligen Windklimas angetrieben. Dahinter steht die Philosophie, dass das bodennahe Windklima nur dann realitätsnah bestimmt werden kann, wenn alle topographischen Einflüsse nur durch das Modell selbst berechnet, nicht aber zusätzlich über die Modellantriebsdaten vorgegeben werden. Häufig werden bei anderen Modellen / Verfahren zunächst bodennah gemessene Winddaten mit Hilfe eindimensionaler Modellrechnungen auf Höhenwinddaten umgerechnet, die dann zum Antrieb der dreidimensionalen Modellrechnungen verwendet werden. Dabei wird außer Acht gelassen, dass jede bodennahe Messung mehr oder weniger durch die Umgebungstopographie oder sogar lokale Effekte (z.B. Bebauung, Bewuchs) geprägt sein kann, so dass die daraus abgeleiteten Höhenwinde bereits Topographie- bzw. Bebauungseinflüsse enthalten können. Gerade in topographisch stark gegliedertem Gelände wie den Mittelgebirgen ist dies von elementarer Bedeutung wenn man berücksichtigt, dass die Strömung bis zur doppelten Höhe ausgeprägter Erhebungen großräumig beeinflusst werden kann.
2. Das Modell METRAS-PC wird mit sogenannten offenen Rändern betrieben, an denen sich die Strömung frei einstellen kann. Im Gegensatz zu festen (Einström-) Randbedingungen passen sich die Strömungsverhältnisse im Modellgebiet vor allem in Randnähe besser an die topographischen Strukturen an. Dieser Qualitätsgewinn in den Simulationsergebnissen kostet allerdings einen erheblichen Mehraufwand an Rechnerressourcen und Bearbeitungszeit, da aufgrund der offenen Ränder die Einschwingzeiten des Modells bis zum Erreichen quasi-stationärer Verhältnisse stark anwachsen.
3. Mesoskalige Modelle sind komplexe Programmwerkzeuge, deren Ergebnisse regelmäßig auf Plausibilität und Anzeichen möglicher Fehler (zum Beispiel numerische Instabilitäten) geprüft werden müssen. Von daher ist eine automatisierte Berechnung von der Modellanwendung bis zur statistischen Auswertung, die bei der Fülle der Modellrechnungen und gleichartiger Verarbeitungsschritte nahe liegen würde, nicht möglich. Bei der Erstellung synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken werden die Ergebnisse jeder einzelnen Clusterrechnung anhand von Laufprotokollen und graphisch aufbereiteten Zeitserien und Modellschnitten für den gesamten Simulationszeitraum geprüft. Im Einzelfall wird entschieden, ob die vorliegenden Ergebnisse für die statistische Auswertung geeignet sind oder ob gegebenenfalls Restarts / Neuinitialisierungen erforderlich werden.

## **4.2 Qualitätssicherung im Berechnungsverfahren**

Der Arbeitsleitfaden zur Qualitätssicherung im Berechnungsverfahren regelt alle einzelnen Berechnungsschritte im Detail, um sicherzustellen, dass jeder Schritt mit den jeweils korrekten Eingabedaten und mit für alle Teilgebiete einheitlichen Parametereinstellungen vorgenommen, sowie alle notwendigen Prüfschritte vollzogen werden.

Der Arbeitsleitfaden regelt detailliert unter anderem folgende Arbeitsschritte:

- Kriterien zur Festlegung der Grenzen eines neuen Teilgebiets;
- Zusammenstellung der Rohdaten von Geländehöhen (GlobDEM50) und Landnutzungen (CORINE2006) für die Modellrechnungen;
- Koordinatentransformation zur Zusammenstellung von Daten unterschiedlicher Systeme;
- Analyse des Geländes im Teilgebiet und einer weiten Umgebung zur Festlegung aus fachlicher Sicht geeigneter Modellgebietsgrößen;
- Aufbereitung mehrerer Modellgitter zur Vorbereitung von Testrechnungen;
- Filterverfahren zur Glättung der Randtopographie der Modellgitter (dadurch werden numerische Störeinflüsse auf die Modellergebnisse minimiert);
- Aufbereitung von repräsentativen NCAR-Reanalysedaten für das Teilgebiet;
- Clusteranalyse der Reanalysedaten;
- Erzeugung einer Clusterzeitserie;
- Vorbereitung, Durchführung und Analyse von Testrechnungen, vor allem zur Auswahl eines geeigneten Modellgebietes;
- Aufbereitung der Modellantriebsdaten für die Produktionsrechnungen auf Basis der Cluster;
- Vorbereitung, Durchführung und Analyse der Produktionsrechnungen;
- Protokollierung jeder einzelnen Produktionsrechnung;
- Visualisierung von Zeitreihen und Strömungsfeldern jeder Produktionsrechnung;
- Einzelkontrolle und visuelle Analyse jeder Produktionsrechnung und Festlegung des Auswertzeitraums; ggf. Wiederholung, Restart, Modifikation der Rechnung oder im Extremfall Aussortieren einer Rechnung;
- analog Vorbereitung, Durchführung und Analyse der Modellrechnungen für die thermodynamischen Strömungssysteme;
- Zusammenstellung und Aufbereitung der Modellergebnisse für die statistische Auswertung;

- Zusammenstellung der Informationen aus Clusteranalyse, Clusterzeitreihen, Modellgebieten und Modellergebnissen für die statistische Auswertung;
- Durchführung der statistischen Auswertung; an den Gebietsrändern unter Einbeziehung der Simulationsdaten aus angrenzenden Teilgebieten;
- Erstellung von Datenarchiven der resultierenden SynAKS;
- Erstellung von Windrosengrafiken und Berechnung Jahresmittel Windgeschwindigkeit jeder SynAKS;
- Aufbereitung der Grafiken und Windgeschwindigkeiten als kml/kmz-Dateien zur flächendeckenden Darstellung in Google Earth™.

Die Berechnungen der SynAKS laufen bereits seit etlichen Jahren. Wegen geänderter Datenlage hat es innerhalb dieser Jahre im Wesentlichen zwei Umstellungen gegeben, aufgrund derer vor allem bei den Gebieten etwa südlich des Mains minimal von dem aktuell gültigen Arbeitsleitfaden abgewichen wird: Die älteren Modellrechnungen verwenden Landnutzungen auf Basis des CORINE2000-Katasters, die neueren Gebiete wurden auf Basis des Katasters CORINE2006 berechnet. Damit verbunden war eine andere Zuordnung von vier CORINE-Klassen zu METRAS-Klassen. Die zweite Umstellung betrifft die Clusteranalyse. Die aktuelle SynAKS-Version 2.05 repräsentiert bundesweit den Zeitraum 01.01.2001 – 31.12.2010. Die seit Einführung der Version 2.05 berechneten Gebiete (überwiegend nördlich von  $\sim 51^\circ$  N) beruhen auf einer Clusteranalyse für diesen Originalzeitraum, für die südlicheren Gebiete wurden die Clusteranalysen noch für frühere Zeiträume durchgeführt. Die Verschiebung im Zeitraum hat nur geringfügige Änderungen der Lage der einzelnen Cluster im Parameterraum zur Folge. Somit war es gerechtfertigt, für die statistische Auswertung den Clustern auf Basis des aktualisierten Zeitraums neue Häufigkeiten zuzuweisen und die statistische Auswertung ohne neuerliche Modellsimulationen zu wiederholen.

### **4.3 Flächendeckende Plausibilitätsprüfung**

Nicht jeder der inzwischen etwa 1,3 Mio. SynAKS-Datensätze kann einzeln überprüft werden. Mit einer flächendeckenden Sichtung der Berechnungsergebnisse in ihrem räumlichen Kontext kann aber die Plausibilität der SynAKS für zusammenhängende Gebiete besser als bei einer Einzelsichtung eingeschätzt werden.

Sind die SynAKS für ein Teilgebiet komplett erstellt und als Windrosen aufbereitet, so werden diese Windrosen und die jahresgemittelten Windgeschwindigkeiten in ihrer räumlichen Verteilung vor dem Hintergrund der Topographie in Google Earth™ einer solchen flächendeckenden visuellen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Dabei werden u.a. einige grundlegende Punkte abgeprüft:

- Sind die Windrosen und Windgeschwindigkeiten vollständig und entsprechen diese dem Rechenraster?

- Sind die Windrosen für sich genommen plausibel oder enthalten sie ungewöhnliche Verteilungen (z.B. nur wenige belegte Windrichtungssektoren)? Falls nein: Lässt sich die Windrichtungsverteilung mit lokalen oder regionalen Geländeeinflüssen erklären?
- Geben die Windrosen größere orographische Strukturen plausibel wieder (z.B. die regionale Umströmung des Harzes)?
- Zeichnen die Windrosen auch kleinere orographische Strukturen plausibel nach, sofern diese in einem 500 m Raster hinreichend aufgelöst werden können und von den Höhendifferenzen her ein nennenswerter Einfluss zu erwarten ist (z.B. das Sostal oberhalb von Osterode)?
- Liegen die Windgeschwindigkeiten in einem für die Region realistischen Wertebereich?
- Geben die Windgeschwindigkeiten (bei vergleichbarem Geländere relief und unter Berücksichtigung der Bezugshöhe von ca. 10 m über Verdrängungshöhe) die Landnutzungsstrukturen wieder (höhere Windgeschwindigkeiten im Freiland, geringer über Wald und Stadt)?
- Zeigen die Windrosen und –geschwindigkeiten stetige Übergänge innerhalb des Teilgebietes und zu anderen Teilgebieten? Falls nein: Lassen sich Unstetigkeiten mit topographischen Strukturen erklären?

## **4.4 Stationsbezogene Repräsentativitätsprüfung**

### **4.4.1 Zur unterschiedlichen räumlichen Repräsentativität von Messungen und synthetischen Daten**

Synthetische Wind- oder Ausbreitungsklassenstatistiken werden in erster Linie zu dem Zweck berechnet, qualitativ hochwertige und repräsentative meteorologische Winddaten für solche Standorte zu erhalten, an denen die umgebende Topographie die Windverhältnisse deutlich beeinflusst, aber keine entsprechenden Messungen vorliegen.

Ohne synthetische Winddaten muss man sich mit der Übertragung von entfernt gemessenen Daten auf den gewünschten Standort behelfen, wobei ohne begleitende Modellrechnungen Annahmen oder Vermutungen über die zu erwartenden charakteristischen Windverhältnisse am Standort getroffen werden müssen. Dies setzt ein gehöriges Maß an meteorologischen und strömungsdynamischen Erfahrungen voraus.

Im Gegensatz zu subjektiven Übertragungen beruhen die synthetischen Daten auf objektiven, einheitlichen Verfahrensvorschriften und physikalischen, evaluierten Modellansätzen. Sie können deshalb schon vom Ansatz her als hochwertiger angesehen werden. Dennoch ist es notwendig, die Qualität synthetischer Daten anhand von Vergleichen mit Messungen zu überprüfen.

Der Vergleich bzw. die Bewertung der Unterschiede zwischen synthetischen und gemessenen Windstatistiken (also die Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit) gestaltet sich als schwierig, was im Wesentlichen auf die unterschiedliche räumliche Repräsentativität bzw. auf die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Mess- und Berechnungsverfahren zurückzuführen ist. Im Hinblick auf die Verwendung in Immissionsprognosen lassen sich zudem kaum objektive Maßzahlen für eine Bewertung von Unterschieden in den Häufigkeitsverteilungen von Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsklassen definieren. Bevor auf die stationsbezogene Repräsentativitätsprüfung eingegangen wird, werden deshalb in den nächsten Abschnitten die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zwischen Messungen und synthetischen Winddaten erläutert.

#### **4.4.1.1 Horizontale Repräsentativität**

Messungen repräsentieren zunächst einmal nur die Verhältnisse direkt am Messstandort. Ob sie darüber hinaus auch die Verhältnisse in einer weiteren Umgebung widerspiegeln, ist für jeden Standort einzeln zu prüfen.

Häufig befinden sich Messstationen im Bereich städtischer Bebauung, wo die Windverhältnisse lokal stark variieren können. Bereits in einigen Dekametern Entfernung können bereits völlig andere Bedingungen vorherrschen. Auch wenn ein direkter Einfluss benachbarter Gebäude auf die Windverhältnisse an der Messstation ausgeschlossen werden kann, reduziert die umgebende Bebauung als erhöhte Rauigkeit die Strömungsgeschwindigkeit im bodennahen Bereich.

Außerhalb städtischer Bebauung können andere Rauigkeitsstrukturen (z.B. Baumgruppen) oder kleinräumige orographische Strukturen den räumlichen Gültigkeitsbereich einer Messung erheblich einschränken.

Der Repräsentativitätsbereich von Messungen ist also variabel und abhängig von der Standortumgebung. Dies veranschaulicht beispielhaft die Abbildung 19 (links). Der rechte Pfeil weist auf einen fiktiven innerstädtischen Messstandort in Balingen, der linke Pfeil auf einen Messstandort außerhalb des Stadtgebietes. Die roten Kreise deuten den horizontalen Repräsentativitätsbereich der Messungen an. Innerhalb der städtischen Bebauung ist dieser stark eingeschränkt und beträgt möglicherweise nur einige Meter. Bei geeigneter freier Lage im außerstädtischen Bereich kann dagegen der Repräsentativitätsradius deutlich größer angesetzt werden.

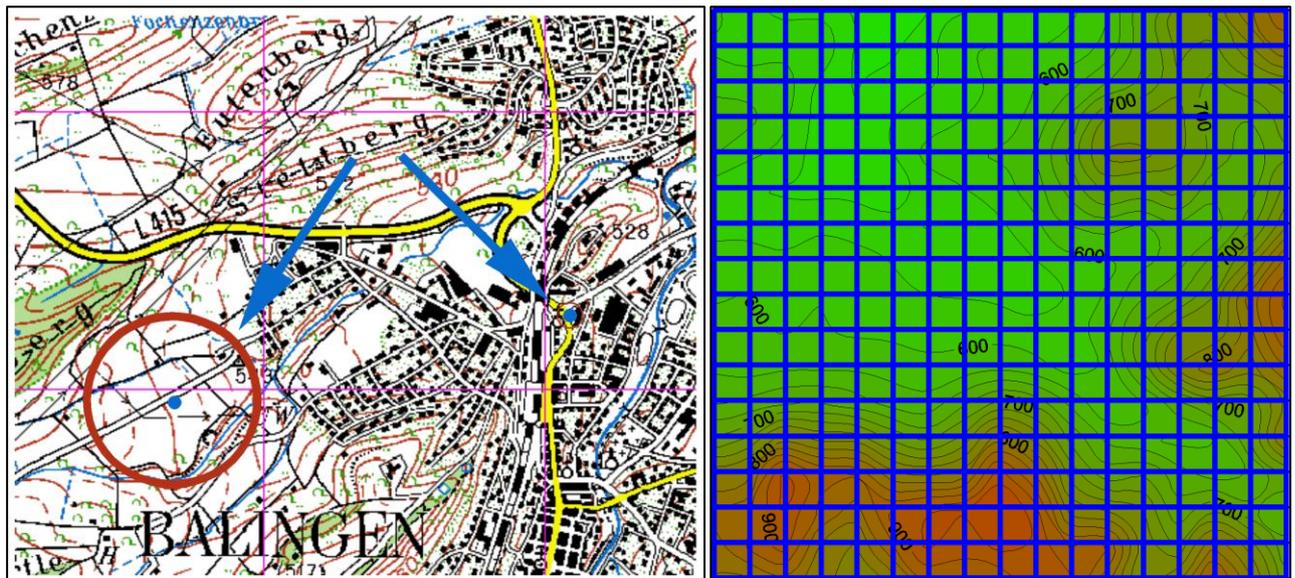


Abbildung 19: Vom Standort abhängige horizontale Repräsentativität von Messungen (links) und einheitliche Repräsentativität synthetischer Windstatistiken auf Modellgitterflächen von 500 m Kantenlänge (rechts).

Die synthetischen Statistiken weisen dagegen einen konstanten Repräsentativitätsbereich auf, der sich nach der Größe der Gitterflächen im Modell richtet (Abbildung 19 rechts). In der aktuell vorliegenden Version der synthetischen AKS liegt dieser bei  $500 \times 500 \text{ m}^2$ . Die synthetischen Daten spiegeln somit die mittleren Verhältnisse über diesen Bezugsflächen wider. Darüber hinaus enthalten sie die Einflüsse eines geglätteten Geländereiefs, weil die Geländehöhen über die Bezugsflächen gemittelt sind (s. Kapitel 2.2.3). Damit sind die Einflüsse kleinerer Geländestrukturen wie z.B. enge Täler oder auch Erhebungen mit Dimensionen, die deutlich unter 500 m liegen, nicht (oder nur abgeschwächt) in den synthetischen Statistiken enthalten. Die Landnutzungen werden bzgl. ihrer prozentualen Anteile innerhalb einer jeden Gitterfläche berücksichtigt.

Messungen und synthetische Daten repräsentieren deshalb in aller Regel unterschiedliche Raumskalen. Nur in Ausnahmefällen werden die von Messungen und synthetischen Daten repräsentativ abgedeckten Flächen näherungsweise deckungsgleich sein. Dieser unterschiedliche physikalische Gehalt beider Datentypen ist immer in Vergleichen zu berücksichtigen.

Die derzeitig den synthetischen Daten zu Grunde liegende Auflösung von 500 m wurde auch unter Berücksichtigung der typischen Anforderungen von Immissionsprognosen gewählt. Die überwiegende Mehrzahl von Immissionsgutachten erfolgt für Untersuchungsräume von einigen 100 m Kantenlänge. Für Ausbreitungsrechnungen werden in der Regel die mittleren (eher großräumigeren) meteorologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet benötigt. Die Einflüsse von kleinräumigen Gelände- und/oder Gebäudestrukturen werden häufig mithilfe mikroskaliger oder mesoskaliger Windfeldmodelle aufgelöst. Gerade in diesen Fällen ist sicherzustellen, dass

der Antrieb frei von lokalen Einflüssen ist, da diese durch die Modelle erfasst werden. Hierfür sind die synthetischen Daten ideal, da sie eine klar definierte Repräsentativität in der Größenordnung typischer Untersuchungsgebiete für Immissionsprognosen aufweisen. Bei mikroskaligen Untersuchungen wie Immissionsprognosen in innerstädtischen Bereichen geben die synthetischen Daten die mittleren, repräsentativen Verhältnisse über Dach wieder und sind frei von lokalen Einflüssen.

#### **4.4.1.2 Höhenbezug**

Windmessungen werden in unterschiedlichen Höhen über Grund vorgenommen. Zwar orientiert sich der Deutsche Wetterdienst bei der Festlegung der Messhöhen in der Regel an einer Höhe von 10 m über der mittleren Höhe von Rauigkeitselementen in der Messumgebung, dennoch variiert der Höhenbezug von Messungen erheblich, insbesondere aber bei privaten Wetterdiensten oder anderen Messnetzen. Bei niedrigen Messhöhen und großer Rauigkeit spiegeln gemessene Statistiken deshalb gelegentlich die Verhältnisse innerhalb von Rauigkeitsstrukturen wider. Des Weiteren gibt es Messungen, die erheblich mehr als 10 m über den Rauigkeitsstrukturen erhoben werden.

In den Modellrechnungen mit METRAS-PC sind die Modellflächen bezüglich einer Höhe oberhalb der Verdrängungshöhe definiert. Das bedeutet, dass die synthetischen Statistiken immer für eine Höhe von etwa 10 m oberhalb der Verdrängungshöhe gültig sind. Dies zeigt Abbildung 20 schematisiert. Neben dem räumlichen Bezug ist bei einem Vergleich von synthetischen und gemessenen Daten also auch der ggf. unterschiedliche Höhenbezug zu berücksichtigen.

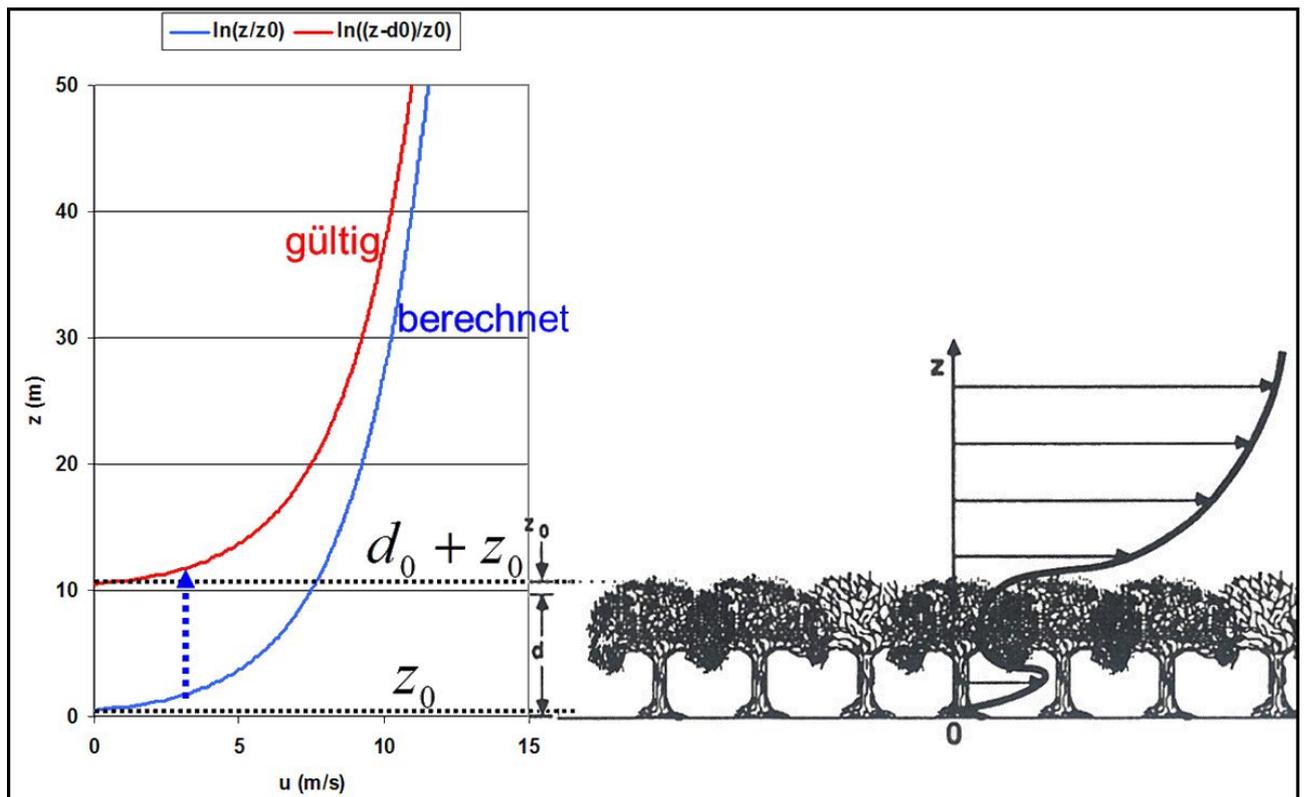


Abbildung 20: Windgeschwindigkeitsprofil über der Verdrängungshöhe.

#### 4.4.1.3 Mögliche Fehlerquellen

Neben den in den vorstehenden Kapiteln diskutierten grundsätzlichen Unterscheidungsmerkmalen sind noch folgende Fehlermöglichkeiten gegeben, die nur schwer quantifizierbar sind.

Gemessene Windstatistiken enthalten Fehler, die auf Geräte-Messfehler im eigentlichen Sinne, aber auch auf die Aufstellung und Justierung (Bsp. Einnordung des Messfühlers) und auf Wartungsmängel zurückzuführen sind. Ein ungeeignet gewählter Messstandort zählt nicht zu diesen Fehlerquellen.

Bei den synthetischen Windstatistiken zählen dagegen die begrenzte Auflösung von Eingangsdaten (Meteorologie, Topographie) sowie die Grenzen der Modellphysik und deren Realisierung zu den Hauptfehlerquellen.

#### 4.4.1.4 Qualität der Datenquelle bei Messungen

Messdaten werden von unterschiedlichen Betreibern (DWD, private Wetterdienste, Behörden, Firmen) erhoben, die zum einen unterschiedliche Qualitätssicherungsmaßnahmen einsetzen und zum anderen die Daten auch für unterschiedliche Zwecke erheben.

Beispielsweise liegt ein Schwerpunkt des DWD auf der flächendeckenden Erhebung großräumig repräsentativer Daten. Das gilt aber nicht generell für jede DWD-Station, da die flächendeckende Repräsentativität nur eine von verschiedenen Schwerpunkten des Messnetzes darstellt. Private Wetterdienste sind häufig an möglichst vielen Messstationen und an der Erfassung von

meteorologischen Extremwerten interessiert, weniger an repräsentativen Winddaten. Die Wartung der Stationen durch fachlich geschultes Personal ist dabei nicht immer sichergestellt. Die Landesbehörden erheben meteorologische Daten in den Immissionsmessnetzen. Bei der Stationsauswahl spielen häufig die Immissionsbelastungen eine größere Rolle als ungestörte meteorologische Verhältnisse.

#### 4.4.1.5 Fazit

Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zwischen gemessenen und synthetischen Windstatistiken sind in Tabelle 1 noch einmal zusammenfassend aufgeführt.

*Tabelle 1: Unterschiedliche Merkmale gemessener und synthetischer Windstatistiken.*

	<b>gemessene Statistik</b>	<b>synthetische Statistik</b>
<b>Raumbezug</b>	Punktmessung	Volumenmittel
<b>Gültigkeitshöhe</b>	teilweise innerhalb Rauigkeit	10 m über Verdrängungshöhe
<b>horizontale Repräsentativität</b>	abhängig von Standortumgebung	konstant 500 x 500 m <sup>2</sup>
<b>Fehlerquellen (nicht quantifizierbar)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gerätefehler</li> <li>- Aufstellung, Justierung</li> <li>- Wartung</li> <li>- Störelemente (Bebauung, Bewuchs)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eingangsdaten (Meteorologie, Topographie)</li> <li>- Modellphysik und -realisierung</li> </ul>

#### 4.4.2 Zum Vergleich synthetischer Daten mit Messdaten

Ein Vergleich zwischen synthetischen Daten und Messdaten macht aus vorstehend Gesagtem nur dann Sinn, wenn die jeweilige räumliche Repräsentativität angemessen berücksichtigt wird. Eine gute Übereinstimmung in den Verteilungen der meteorologischen Merkmale Windrichtung und Windgeschwindigkeit zwischen synthetischen Winddaten und Messungen ist nur dann zu erwarten, wenn auch die Messungen eine mit den synthetischen Daten vergleichbare räumlich horizontale Repräsentativität von etwa 500 x 500 m<sup>2</sup> aufweisen.

„Ideale“ Messstandorte im Sinne vollkommen homogener Umgebungsbedingungen gibt es nicht. Deshalb werden Messungen, auch bei einer mit synthetischen Daten vergleichbaren räumlichen Repräsentativität, fast immer auch kleinskalige topographische und/oder subskalige lokale Einflüsse durch Gebäude und Vegetation enthalten, die durch die synthetischen Daten nicht aufgelöst werden. Beispielsweise kann eine entfernt stehende Baumgruppe die mittlere Windgeschwindigkeit in einem Anströmsektor geringfügig reduzieren oder ein kleines Gebäude in einem anderen Sektor zu einer leichten Verschiebung in den Häufigkeiten benachbarter Windrichtungssektoren führen. Wegen der Existenz solch subskaliger Einflüsse bestimmt bspw. der Deutsche Wetterdienst die Rauigkeit an seinen Standorten sektorbezogen.

In gemessenen Windrosen können sich die genannten subskaligen Einflüsse zum Beispiel darin zeigen, dass innerhalb eines breiten Häufigkeitsmaximums um südwestliche Windrichtungen, ein einzelner 10°-Sektor eine auffallend geringere oder höhere Häufigkeit als die angrenzenden Sektoren aufweist. In den nachfolgenden Vergleichen werden Messstandorte aber erst dann als „subskalig beeinflusst“ und damit als Standorte mit „nicht vergleichbarer räumlicher Repräsentativität“ eingestuft, wenn die subskaligen Einflüsse zu einer charakteristisch anderen Verteilung von Windrichtungen und/oder Windgeschwindigkeitsklassen führen.

Im Rahmen von Immissionsberechnungen, in denen hauptsächlich Ausbreitungsklassenstatistiken als Antrieb zum Einsatz kommen, sind kleinskalige Einflüsse nicht unbedingt erwünscht, da diese meist durch die den Ausbreitungsrechnungen vorgeschalteten Windfeldmodellen aufgelöst werden. Insofern sind in der praktischen Anwendung Winddaten als Antrieb gewünscht, die zum einen die großräumigen orographischen Strukturen, zum anderen die eher großflächigen Landnutzungen, die die Rauigkeiten prägen, wiedergeben und möglichst frei von lokalen Einflüssen sind. Genau das liefern synthetische Daten; sie sind somit gut als Antrieb für Ausbreitungsrechnungen geeignet, da sie die Windverhältnisse in 10 m oberhalb der Verdrängungshöhe wiedergeben. Dies entspricht bspw. in städtischen Gebieten dem nicht durch lokale Einflüsse gestörten Überdachwind.

Im Zuge der stationsbezogenen Qualitätssicherung wurden und werden von der Arbeitsgemeinschaft METCON – IB Rau für viele Messstationen in Deutschland Vergleiche mit synthetischen Daten durchgeführt. Dabei treten Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen und/oder Windgeschwindigkeiten auf, die analysiert werden. Meist sind die Unterschiede auf erklärbare Differenzen in der jeweiligen Repräsentativität zurückzuführen oder, falls diese vergleichbar ist, auf subskalige Effekte, die von den synthetischen Daten nicht explizit aufgelöst werden. Um die Unterschiede „fassbar“ zu machen, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, eine Bewertung der Vergleiche nach folgender Gruppierung vorzunehmen:

Bei Standorten der **Gruppe 1** ist meist davon auszugehen, dass einerseits eine vergleichbare räumliche Repräsentativität zwischen Messstation und synthetischen Daten vorliegt und andererseits die Distanz zwischen Messstandort und Lage der SynAKS (diese entspricht dem Schwerpunkt des 500 x 500 m<sup>2</sup>-Rechenrasters) gering ist. Solche Standorte zeigen, je nach Übereinstimmung des Repräsentativitätsbereiches, sowohl eine gute bis sehr gute Übereinstimmung in den charakteristischen Merkmalen der Windrichtungsverteilung als auch der Windgeschwindigkeiten. Dennoch führen subskalige Effekte an den Messstandorten, wie oben erläutert, zu einer gewissen Bandbreite an Differenzen zwischen Messdaten und synthetischen Daten.

In **Gruppe 2** werden die Stationsvergleiche eingestuft, bei denen lokale, ausgeprägte topographische Strukturen dominieren, die zum einen den Repräsentativitätsbereich der

Messungen stark einschränken und zum anderen durch die synthetischen Daten nicht aufgelöst werden können. Dies kann zu stärkeren Abweichungen in der Windrichtungsverteilung und / oder mittleren Windgeschwindigkeit führen. Dazu zählen bspw. Messungen in Kuppenlage oder Messungen in engen Tälern.

In **Gruppe 3** werden die Stationsvergleiche eingestuft, bei denen die Windrichtungsverteilung und / oder mittlere Windgeschwindigkeit zwischen Messung und synthetischen Daten auf Grund von subskaligen, lokalen Gebäude- oder Vegetationseinflüssen differieren. Dies kann im Einzelfall den Repräsentativitätsbereich der Messung gegenüber den synthetischen Daten stark einschränken. Sehr häufig handelt es sich hierbei um Messstationen im städtischen Umfeld.

Die Übergänge zwischen den drei Gruppen sind erwartungsgemäß fließend. Trotzdem ist die Einteilung in diese „Vergleichsgruppen“ ein hilfreiches Werkzeug, um die Unterschiede zwischen gemessenen und synthetischen Daten auf einer physikalischen Basis zu objektivieren.

Im Folgenden wird für jede der vorab genannten drei Gruppen ein charakteristisches Beispiel vorgestellt und näher erläutert. Weitere Beispiele zu den drei Gruppen sind im Anhang zu finden. Dabei machen die im Anhang dargestellten Vergleiche nur einen Bruchteil der im Zuge der flächendeckenden Qualitätssicherung durchgeführten Vergleiche aus. Für die Vergleiche wurden die frei verfügbaren Daten aus der DWD-Grundversorgung sowie die von mehreren Bundesländern zur Verfügung gestellten (bzw. aus dem Internet frei beziehbaren) Daten der Landesmessstationen herangezogen.

Dabei wurden vorzugsweise die Stationen berücksichtigt, die

- einen möglichst langen Messzeitraum (möglichst 10 Jahre) und
- einen mit dem Antriebszeitraum der synthetischen Daten (2001 – 2010) vergleichbaren bzw. möglichst aktuellen Zeitraum abdecken

und bei denen die für einen Vergleich notwendigen Angaben vorliegen.

Bei den Daten der DWD-Grundversorgung handelt es sich um stündliche Daten von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Bedeckungsgraden. Zur Ermittlung der dreidimensionalen Ausbreitungsklassenstatistiken wurden von der ARGE gemäß der VDI-Richtlinie VDI 3782 Blatt 1 die AK-Klassen ermittelt.

Bei den Landesmessstationen liegen einstündige Daten der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung vor. Hier beschränkt sich ein möglicher Vergleich somit auf den Vergleich der Häufigkeit von Windrichtungen und Windgeschwindigkeit.

Die Zusammenstellung im Anhang soll Zug um Zug um weitere Beispiele ergänzt werden.

### **4.4.3 Beispielhafte Vergleiche an Messstationen**

#### **4.4.3.1 Gruppe 1**

In Gruppe 1 wird aufgrund vergleichbarer räumlicher Repräsentativität eine gute Übereinstimmung in den charakteristischen Merkmalen der gemessenen und synthetischen Windstatistiken (mittlere Windgeschwindigkeit, Windrichtungsverteilung) erzielt.

Bei den Messstationen der Gruppe 1 handelt es sich häufig um Stationen, die am Rande von bebauten Gebieten oder sogar recht frei liegen und bei denen die Messhöhe deutlich höher als die umgebende Bebauung ist. Somit können lokale, durch Bebauung oder Vegetation verursachte Einflüsse, die in aller Regel den Repräsentativitätsbereich stark einschränken können, weitgehend ausgeschlossen werden. Auch gibt es in der Nähe keine Geländestrukturen, die so kleinskalig sind, dass sie von den synthetischen Daten nicht mehr aufgelöst werden können. Darauf ist die recht gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Windverteilungen und Windgeschwindigkeiten zurückzuführen. Sehr häufig erfüllen die Messstationen aus der DWD-Grundversorgung diese Kriterien.

Die in dieser Gruppe im Folgenden bzw. im Anhang dargestellten Vergleiche weisen Windrichtungsverteilungen mit ganz unterschiedlichen Charakteristiken auf. Die Übereinstimmung mit den berechneten Windrosen zeigt grundsätzlich, dass die synthetisch ermittelten Windrosen in ihrem Repräsentativitätsbereich die Modifikation der großräumigen Windströmung durch regionale Rauigkeits- und Topographieeinflüsse sehr gut wiedergeben.

Eine typische Messstation, für die die vorab genannten Kriterien zutreffen, ist die DWD-Station Mannheim.

Die Station befindet sich am östlichen Rand der Stadt Mannheim im Übergangsbereich zwischen nördlicher Oberrheinniederung und der Neckar-Rhein-Ebene. Das Stationsgebäude befindet sich etwa 5 m südwestlich des Windmessmastes. Die Messung erfolgt 22 m über Grund. Südwestlich bis nordwestlich ist die Station von Gebäuden und Bäumen einer Vorstadtsiedlung umgeben, die südlich und östlich von hohen Baumreihen begrenzt wird. Die südlich der Siedlung gelegene Baumreihe reicht bis auf etwa 30 m an den Messmast heran. Die nordöstlich bis östlich gelegene Baumreihe steht zwischen Gewerbegebiet und Messmast. In den übrigen Richtungen ist die Station zunächst von einer baumbestandenen Wiese umgeben, an die nach wenigen Metern landwirtschaftliche Nutzflächen anschließen. Das Gelände ist nahezu eben (s. Abbildung 22). Die Repräsentanz wird vom DWD als „regional“ eingestuft [21].

Die SynAKS und die Messung zeigen beide das Hauptmaximum für Winde aus südlicher Richtung sowie das Nebenmaximum für Winde aus der entgegengesetzten nördlichen Richtung. Die Häufigkeiten für die nördlichen und südlichen Windrichtungen sind bei der SynAKS etwas höher als bei den Messungen; dafür weisen die Messungen etwas höhere Häufigkeiten bei östlichen bis

südöstlichen Windrichtungen auf, die bei der SynAKS nahezu nicht vorhanden sind. Die gute Übereinstimmung der Windrichtungscharakteristik ist auf die relativ homogene Rauigkeitsstruktur im Umfeld der Messstation zurückzuführen, wobei die kleinskaligen Differenzen der Bebauung und des Bewuchses in den einzelnen Windrichtungssektoren die geringen Unterschiede in der Windrichtungen verursachen dürften. Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten zeigt, wie auch die jahresmittlere Windgeschwindigkeit, eine sehr gute Übereinstimmung. Bei den AK-Klassen ist die stabile Klasse AK I bei der SynAKS etwas schwächer, die neutrale Klasse AK III etwas stärker vertreten als bei den Messungen.

Insgesamt stimmen die Messung und die SynAKS bzgl. ihres Repräsentativitätsbereiches gut überein.

Gruppe1: DWD-Station Mannheim

Koordinaten GK/DHDN: RW 3467778 m HW 5485913 m

Lage: 96 m ü. NN Höhe des Anemometers: 22 m

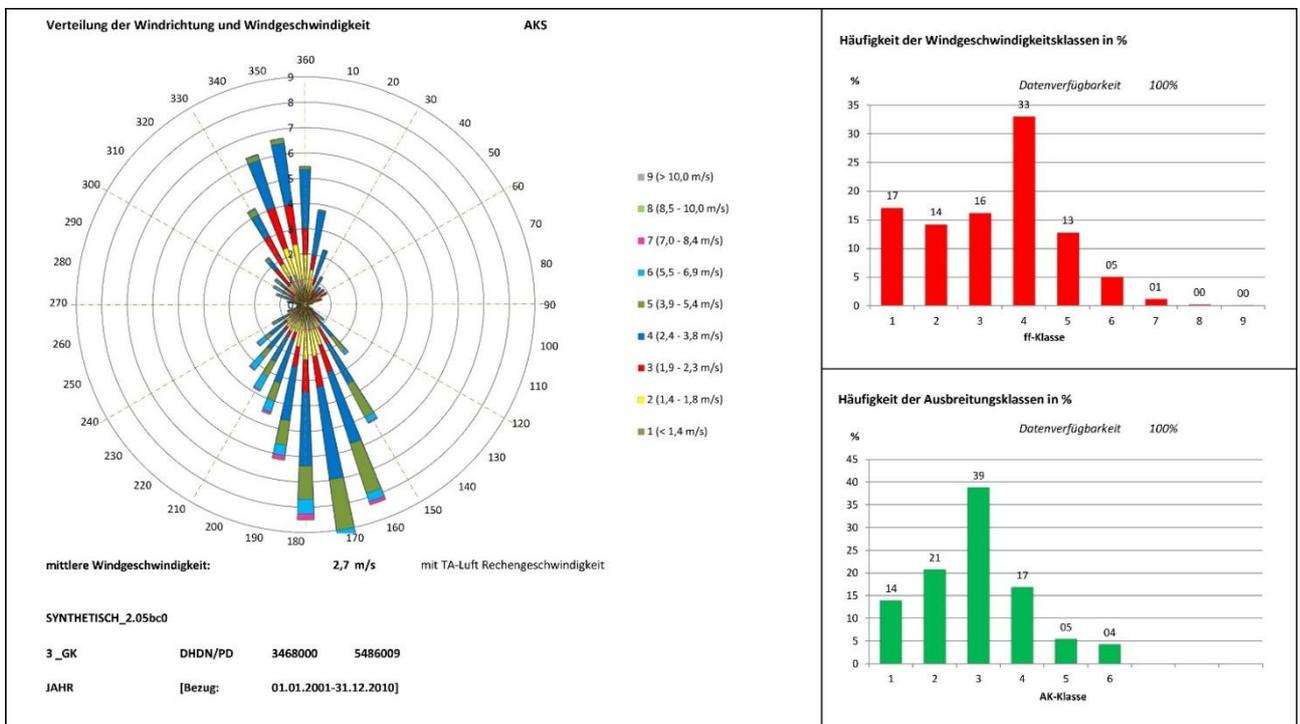
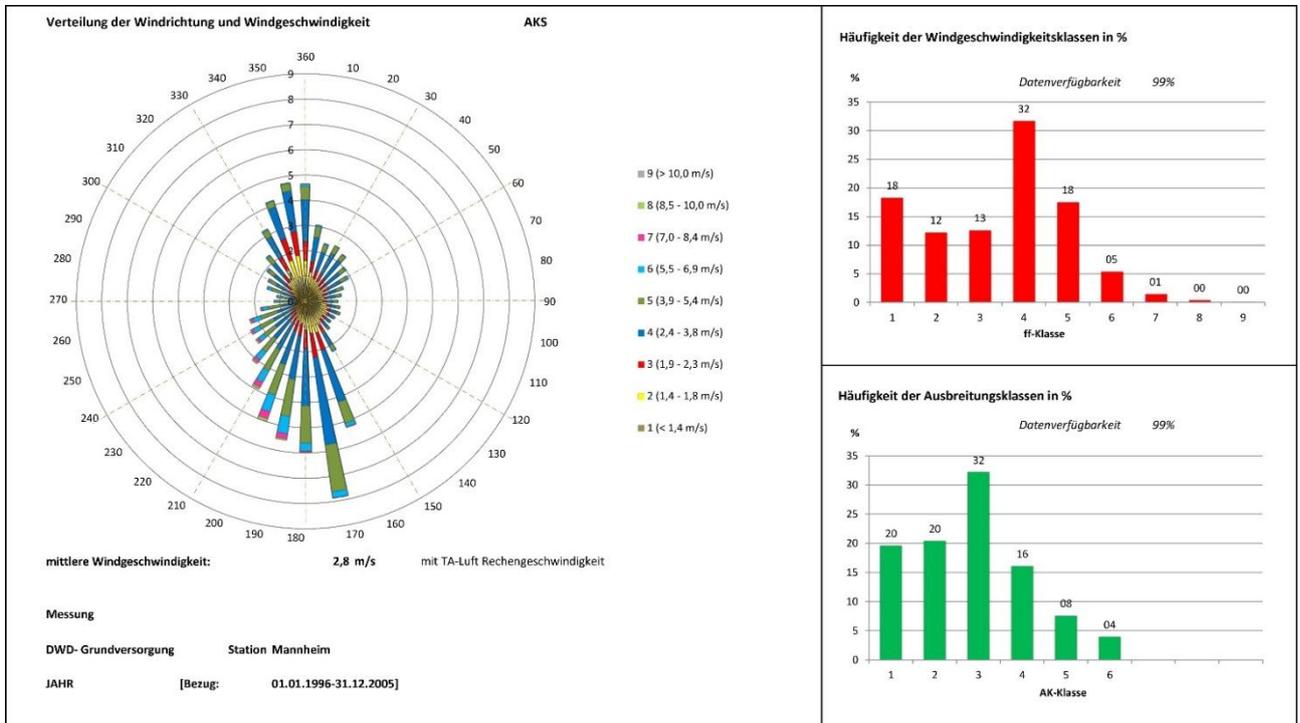


Abbildung 21: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der DWD-Station Mannheim (oben) und der nächstgelegenen SynAKS (unten).

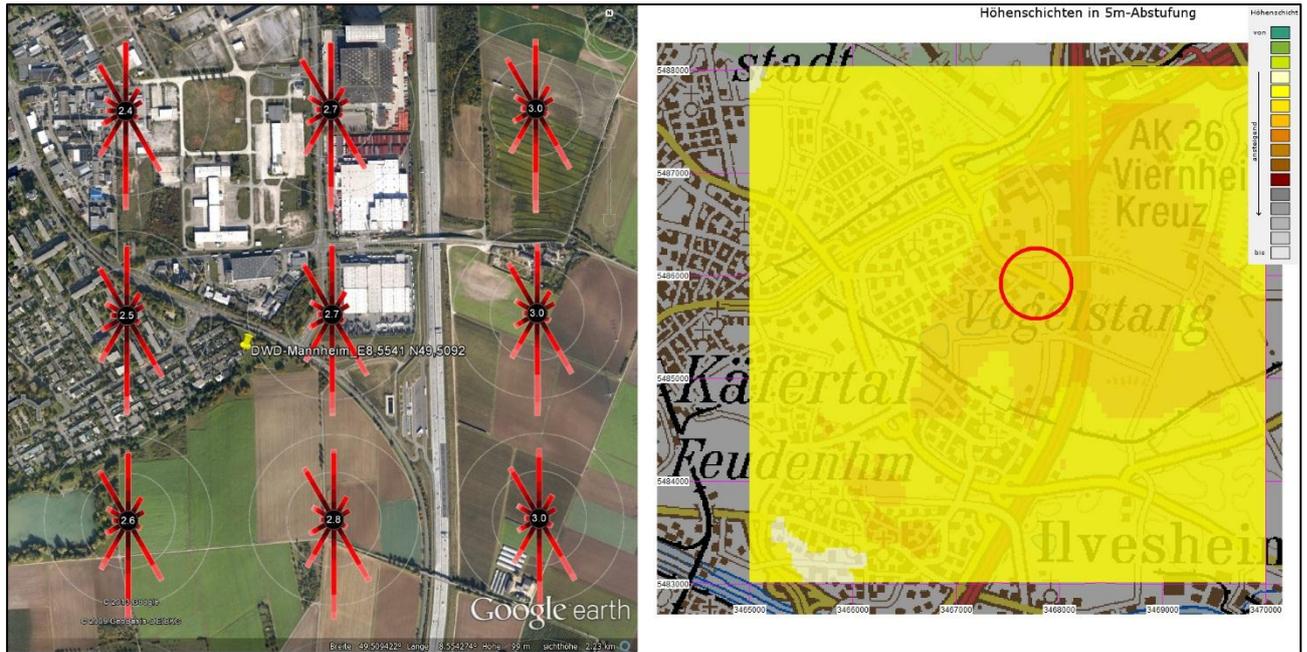


Abbildung 22: 3x3-Windrosenbeet in Google Earth™ (links) und Darstellung der Geländestruktur (rechts) im Umfeld der DWD-Station Mannheim.

#### **4.4.3.2 Gruppe 2**

In Gruppe 2 dominieren subskalige orographische Effekte. Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise Messstationen in exponierter Lage oder aber in Tallage. Messstationen in exponierter Lage werden meist frei angeströmt. In diesen Fällen wird oft eine gute Übereinstimmung der Charakteristika der Windrichtungsverteilungen mit den SynAKS erzielt. Allerdings sind bei Messstationen in Kuppenlage deutliche Unterschiede in der mittleren Windgeschwindigkeit zu verzeichnen. Dies ist meist auf einen „Speed-Up“-Effekt bei den Messungen zurückzuführen. Ist die ausgeprägte topographische Erhebung räumlich begrenzt, wird sie von den synthetischen Windstatistiken nicht hinreichend aufgelöst, was die in diesen Fällen deutlich niedrigeren Windgeschwindigkeiten bei den SynAKS erklärt. Wie in Kapitel 3.2 erläutert wurde, nähern sich bei Berechnungen mit einem feineren Raster die Windgeschwindigkeiten für diese Fälle zwischen Messung und SynAKS immer mehr an. Bezüglich der Windgeschwindigkeiten weisen daher Messstationen in exponierten Lagen eine nur eingeschränkte räumliche Repräsentativität auf.

Bei Messungen in Tallage erfolgt, je nach Enge des Tals und dem Anstieg der Randhöhen, oft eine starke Kanalisierung. Die Hauptwindrichtungen verlaufen dabei meist in Talachse. Bei Tälern mit Querausdehnungen deutlich unter 500 m (Rechenraster der SynAKS), wird ein solches Tal durch die SynAKS nicht aufgelöst.

Wenn subskalige orographische Effekte dominieren führt dies meist dazu, dass der Repräsentativitätsbereich der Messungen einerseits stark eingeschränkt wird und andererseits die Effekte durch die synthetischen Daten nicht aufgelöst werden können. Die Folge sind mehr oder weniger starke Abweichungen in den Windrichtungsverteilungen und / oder der mittleren Windgeschwindigkeit.

Ein gutes Beispiel für Gruppe 2 ist die Station Wasserkuppe in der Rhön. Auf der Wasserkuppe werden sowohl Messungen durch den DWD als auch durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (LUG Hessen) durchgeführt.

Die DWD-Messstation befindet sich auf einem 5 m hohen Gebäude auf dem abgeflachten und unbewachsenen Gipfel der Wasserkuppe. Die Messung erfolgt 10 m über Grund. Die Gebäude nordöstlich und südwestlich des Messstandortes reichen bis auf etwa 40 m an diesen heran. Außerhalb des kahlen Gipfelplateaus wechseln kleinere Siedlungsbereiche, Wälder, Wiesen und landwirtschaftlich genutzte Flächen ab. Die Repräsentanz dieses Standortes wird vom DWD als regional eingestuft [21].

Etwa 220 m südwestlich der DWD-Station steht der Messcontainer der LUG Hessen (s. Abbildung 24), ebenfalls noch auf dem Gipfelplateau. Die Messung erfolgt ca. 8 m über Grund. Etwa 40 m nordöstlich des Containers befindet sich eine alte Radarstation mit mächtiger Kuppel.

Die Charakteristika der Windrichtungsverteilung zwischen DWD-Messstation (Abbildung 23 oben)

und der SynAKS (Abbildung 23 Mitte) stimmen gut überein. Beide Verteilungen zeigen das Hauptmaximum für westsüdwestliche Windrichtungen und eine recht gleichmäßige Verteilung der Windrichtungen zwischen Nord und Süd mit einem Minimum für östliche Winde. Für den Vergleich wurde die nordwestliche SynAKS herangezogen, die ca. 270 m vom DWD-Messstandort entfernt liegt. Kleinere Verschiebungen in den Windrichtungsverteilungen zwischen Messstation und SynAKS ergeben sich alleine schon durch diese Entfernung infolge verschobener Repräsentativitätsbereiche. Die jahresmittlere Windgeschwindigkeit liegt bei der Messung mit 6,2 m/s gegenüber 4,5 m/s bei der SynAKS ca. 40% über dem Wert der SynAKS. Dies liegt an dem exponierten Standort der Messung auf dem Plateau und ist auf den Speed-Up-Effekt zurückzuführen. Da die SynAKS auf der über das Rechenraster gemittelten Geländehöhe beruht, wird dieser lokale Effekt nicht wiedergegeben.

Die Windrichtungsverteilung der LUG-Station (Abbildung 23 unten) weicht in den wesentlichen Merkmalen von den Verteilungen der DWD-Station und der SynAKS ab. Es bildet sich eher eine dreigipflige Verteilung mit dem Hauptmaximum aus SW, allerdings etwas abgeschwächt gegenüber den vorab gezeigten Verteilungen und zwei Nebenmaxima aus SO und NW. Die mittlere Windgeschwindigkeit ist mit 6,6 m/s sogar etwas höher als die an der DWD-Station gemessene. Allerdings zeigt die der LUG-Station näher gelegene SynAKS südlich der Messstation auch eine andere Verteilung als die für den Vergleich mit der DWD-Station herangezogene SynAKS (s. Abbildung 25): Die Windrichtungshäufigkeit aus WSW ist reduziert, die Windrichtung WNW nimmt an Häufigkeit zu.

Die Unterschiede der gemessenen Windrichtungsverteilungen zeigen, dass der Repräsentativitätsbereich der Messungen deutlich unter 500 m liegt. Subskalige orographische Einflüsse verursachen die Unterschiede in den Verteilungen. Die jeweils zu den Messstationen nächstgelegenen SynAKS stimmen in den Charakteristika der Windrichtungsverteilungen gut mit den jeweiligen Messungen überein. Die mittleren gemessenen Windgeschwindigkeiten sind wegen der exponierten Lage des Gipfelplateaus 40 bis 45 % höher als die berechneten Windgeschwindigkeiten. Allerdings ist der Speed-Up-Effekt wegen des vergleichsweise großflächigen Gipfelplateaus eher schwächer ausgeprägt.

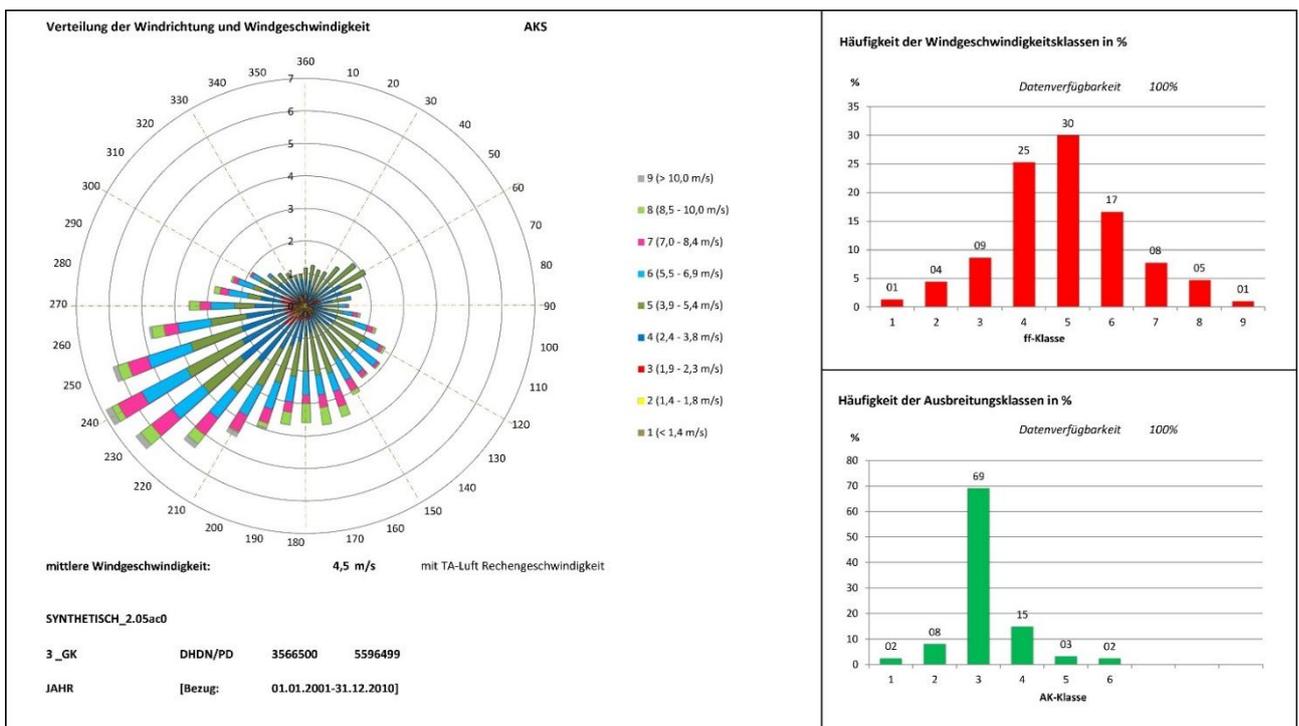
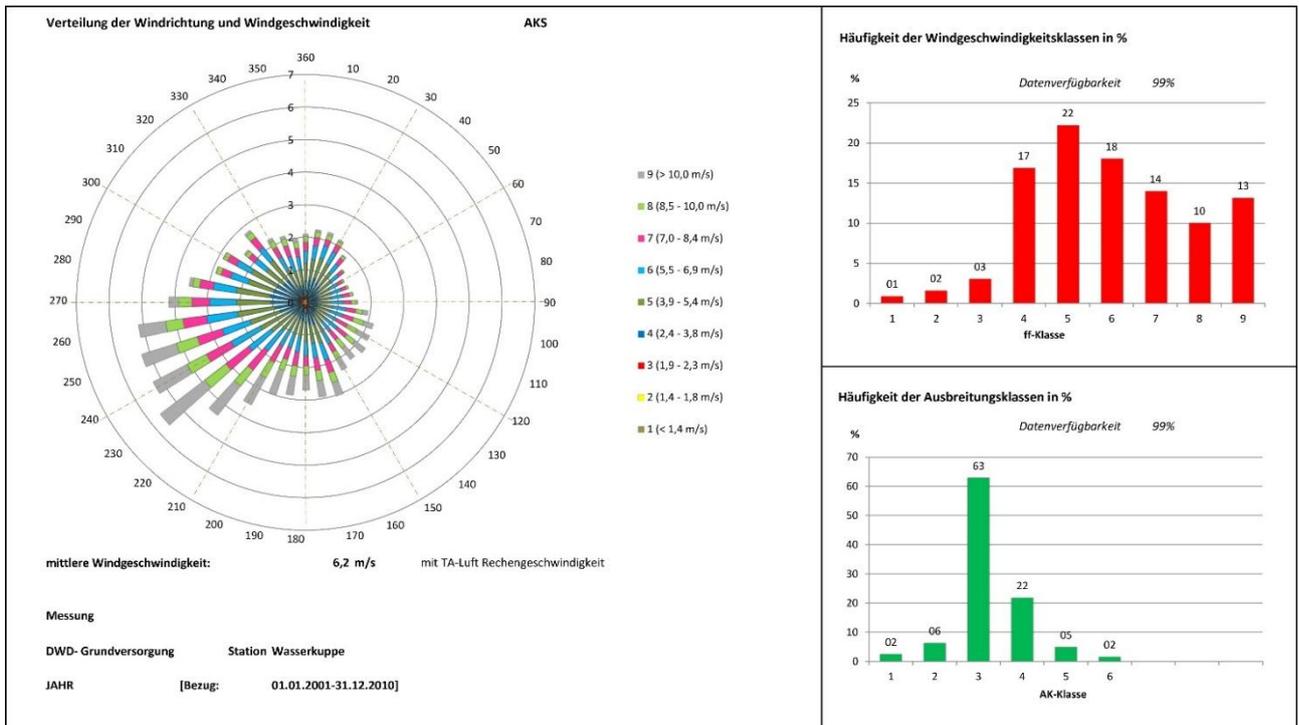
**Gruppe 2: DWD-Station Wasserkuppe und LUG-Station Wasserkuppe**

Koordinaten GK/DHDN: DWD-Station: RW 3566670 m HW 5596285 m

LUG-Station: RW 3566475 m HW 5596188 m

Lage: DWD-Station: 943 ü. NN Höhe des Anemometers: 10 m

LUG-Station: 931 ü. NN Höhe des Anemometers: 8 bis 10 m



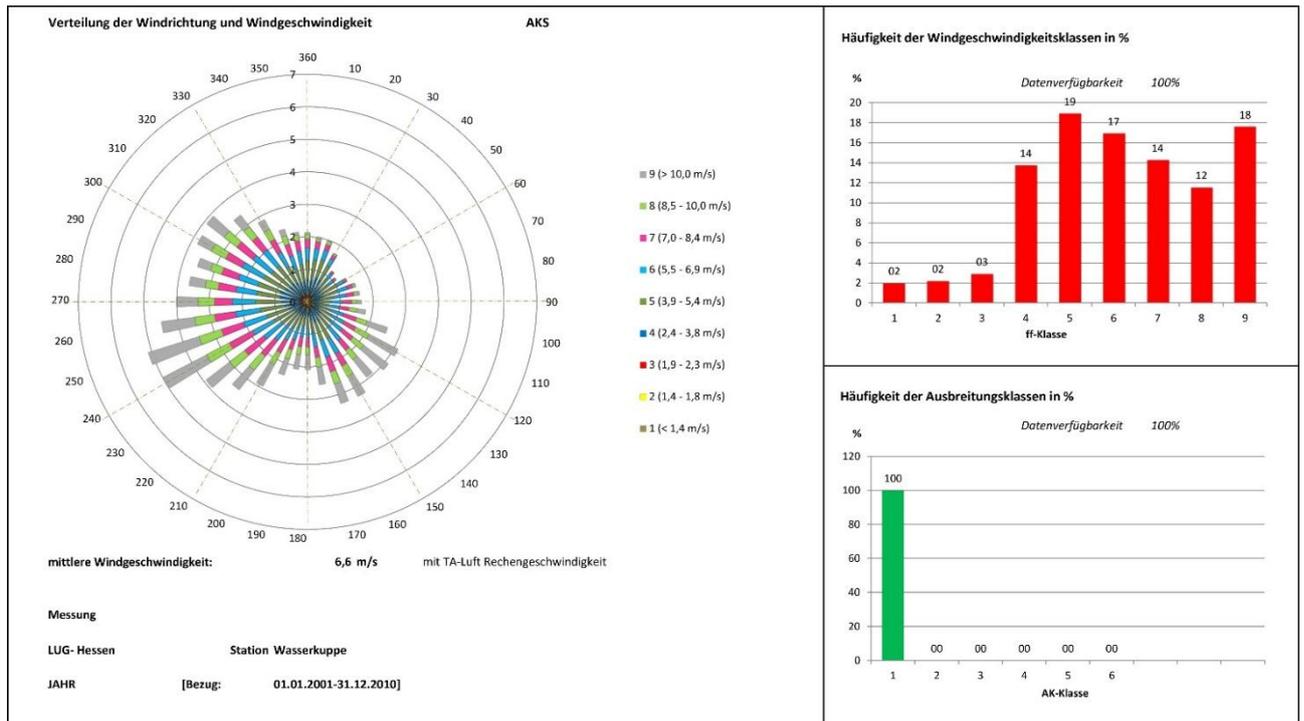


Abbildung 23: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der DWD-Station Wasserkuppe (oben), und der nächstgelegenen SynAKS (Mitte) sowie der LUG-Station Wasserkuppe (unten), welche ca. 218 m weiter südwestlich aber noch auf dem Gipfelplateau steht.



Abbildung 24: LUG-Station Wasserkuppe – Messcontainer.

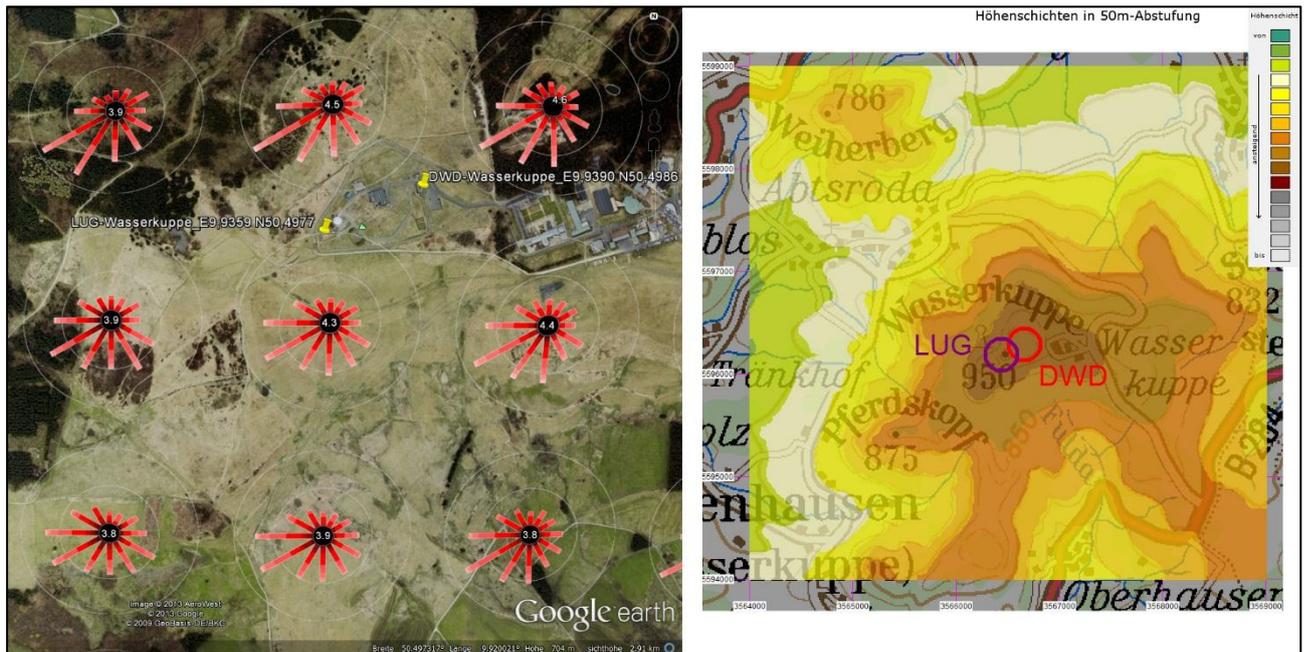


Abbildung 25: 3x3-Windrosenbeet in Google Earth™ (links) und Darstellung der Geländestructur (rechts) im Umfeld der DWD-Station und der LUG-Station auf der Wasserkuppe.

#### **4.4.3.3 Gruppe 3**

In Gruppe 3 werden die Stationen eingestuft, an denen subskalige, lokale Gebäude- oder Vegetationseinflüsse zu erheblichen Differenzen zwischen den charakteristischen Windrichtungsverteilungen und / oder mittleren Windgeschwindigkeiten von Messung und synthetischen Daten führen. Die Messungen sind in diesen Fällen bzgl. der Windrichtungsverteilungen, aber auch bzgl. der mittleren Windgeschwindigkeiten nur begrenzt räumlich repräsentativ. Diese subskaligen Einflüsse werden durch die SynAKS nicht aufgelöst, was auch im Sinne der in Kapitel 4.4.2 dargelegten Gründe gewünscht ist. Häufig handelt es sich bei diesen Messstationen um Stationen im städtischen Umfeld, die meist nicht vorrangig zur Ermittlung meteorologischer Daten, sondern für Immissionsmessungen im Rahmen der Landesmessnetze vorgesehen sind.

Als typisches Beispiel für die Gruppe 3 sei hier Frankfurt-Höchst aufgeführt. Die Messung (Abbildung 26) zeigt eine starke Kanalisierung der Windrichtungen auf West ( $260^\circ$  bis  $270^\circ$ ) und die Gegenrichtung Ost ( $80^\circ$ ). Die Häufigkeit der übrigen Windrichtungen ist nahezu vernachlässigbar. Die jahresgemittelte Windgeschwindigkeit liegt bei 1,4 m/s.

Die SynAKS weist eine völlig andere Verteilung auf, und zwar das Hauptmaximum für Winde aus südsüdwestlicher Richtung und das Nebenmaximum für Winde aus nordnordöstlicher Richtung. Die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m über Verdrängungshöhe liegt mit 2,2 m/s deutlich über der Messung. Das Windrosenbeet der SynAKS in Abbildung 27 zeigt im Umfeld nahezu identische Windrichtungsverteilungen. Darüber hinaus werden über dem gesamten Stadtgebiet ähnliche Windrichtungsverteilungen berechnet. Diese grundsätzliche Orientierung der Hauptwindrichtungen auf SSW und NNO wird auch von der mehr als 15 km östlich gelegenen LUG-Station Frankfurt-Ost bestätigt (Abbildung 28).

Aus Abbildung 27 ist erkennbar, dass die bei Frankfurt-Höchst gemessenen Windrichtungen exakt den Verlauf der Bahntrasse und des hierzu parallel verlaufenden Straßenraums widerspiegeln. Die Luftbildaufnahme mit dem Messcontainer lässt vermuten, dass die Messung deutlich unterhalb der mittleren Bebauungshöhe erfolgt. Das bedeutet, dass die Messung räumlich nur über wenige Dekameter, und zwar im Straßenraum, repräsentativ ist. Dies wird auch durch das äußerst niedrige Geschwindigkeitsniveau bestätigt. Die SynAKS gibt dagegen die großräumigeren Verhältnisse oberhalb der mittleren Gebäudehöhe wieder und ist nicht durch kleinskalige Gebäudeeinflüsse beeinflusst. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Messstation von der LUG selbst als stark gebäudebeeinflusst eingestuft wird. Sie wird deshalb als gutes Beispiel zur Erläuterung der Gruppe 3 herangezogen.

Gruppe 3: LUG-Station Frankfurt-Höchst

Koordinaten GK/DHDN: RW 3467490 HW 5552011

Lage: 104 m ü. NN Höhe des Anemometers: unbekannt

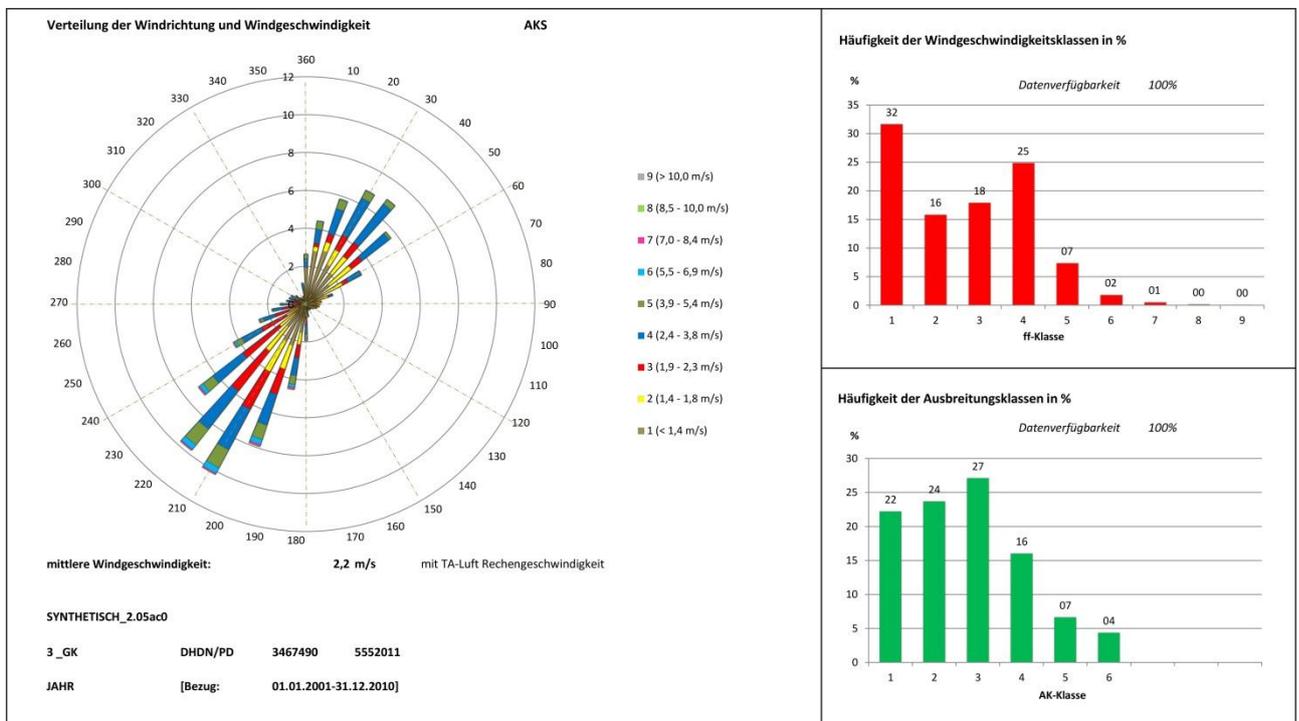
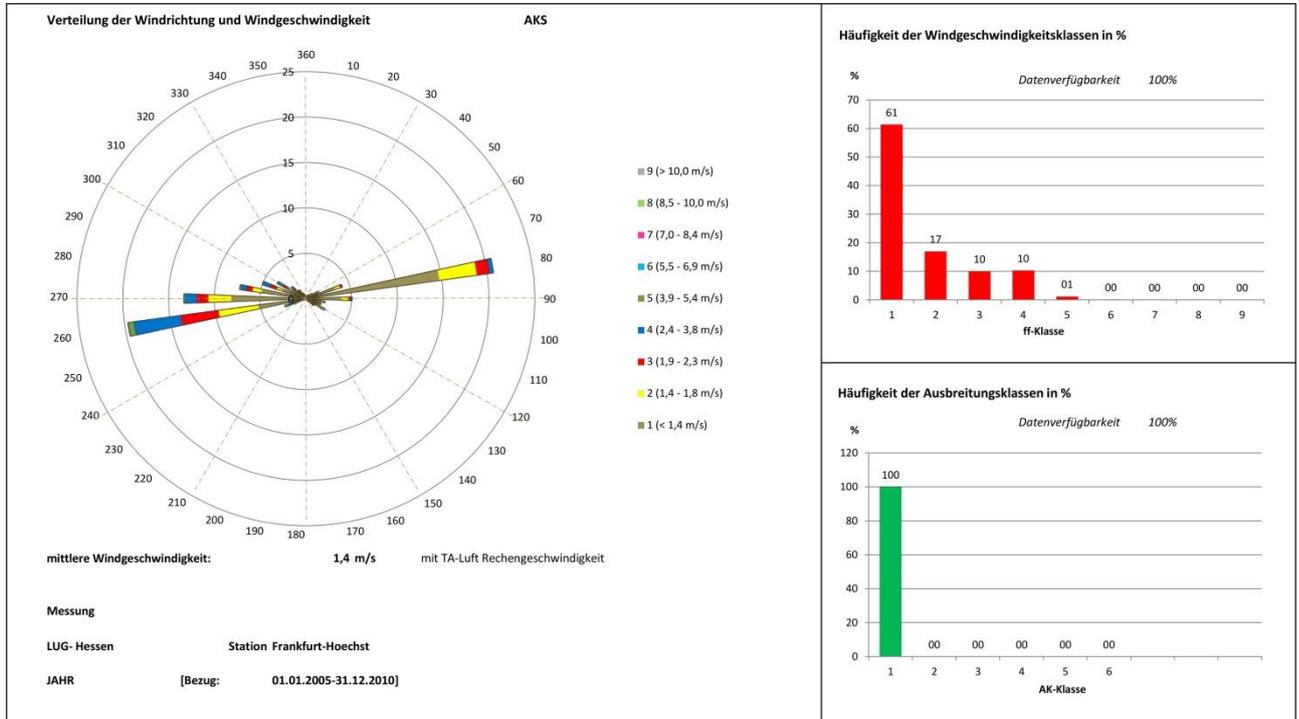


Abbildung 26: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der LUG-Station Frankfurt-Höchst (oben) und der nächstgelegenen SynAKS (unten).

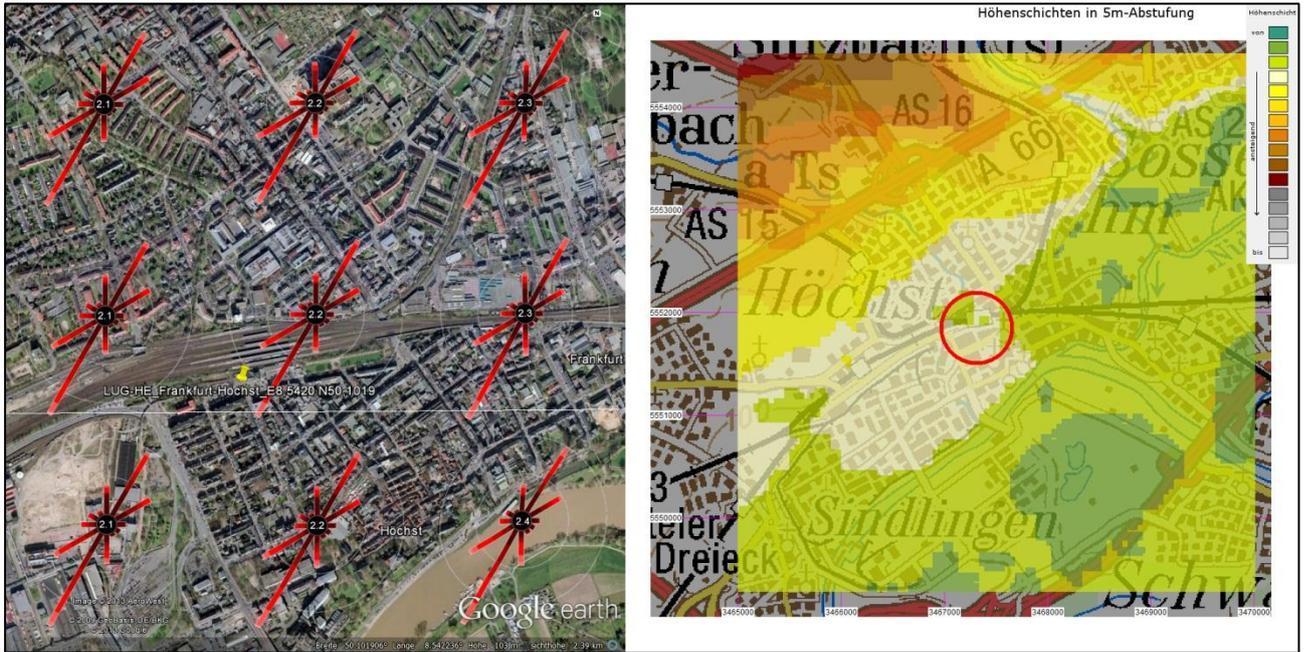


Abbildung 27: 3x3-Windrosenbeet in Google Earth™ (links) und Darstellung der Geländestruktur (rechts) im Umfeld der LUG-Station Frankfurt-Höchst.

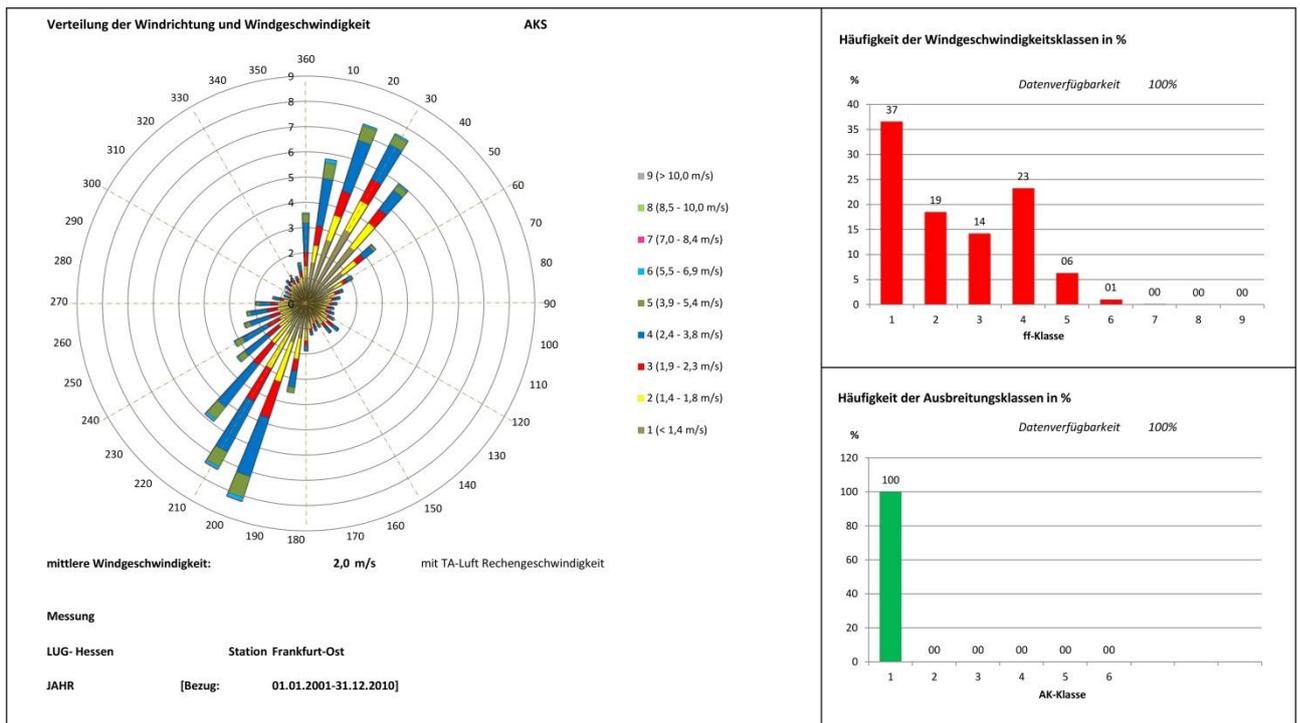


Abbildung 28: Windrichtung und Häufigkeitsverteilungen der LUG-Station Frankfurt-Ost.

## **4.5 Plausibilitätsprüfung im Einzelfall**

Weder durch die flächendeckende Plausibilitätsprüfung (Kapitel 4.3) noch durch die stationsbezogene Repräsentativitätsprüfung (Kapitel 4.4) kann die Qualität jeder der insgesamt mittlerweile weit über 1 Mio synthetischen Datensätze im Vorfeld erfasst werden.

Wenn eine SynAKS für einen Standort angefordert wird, erfolgt, wenn durch den Gutachter nicht explizit eine Repräsentativitätsprüfung (s. Kapitel 4.6) gefordert wird, eine Vorprüfung dahingehend, ob die synthetische Windstatistik räumlich repräsentativ ist. Eine Einschränkung der Repräsentativität wäre dann gegeben, wenn die zu erwartenden Windverhältnisse und damit auch Ausbreitungen am Standort durch kleinskalige topographische Strukturen dominiert werden, die durch die synthetischen Statistiken nicht aufgelöst werden können. Zur Beurteilung werden die Windrose am Standort sowie die Windrosen im Umfeld des Standortes vor dem Hintergrund einer topographischen Karte oder eines Luftbildes beurteilt. In dem Beispiel (Abbildung 29) aus dem Raum Schramberg läge beispielsweise der interessierende Standort in dem engen, von West nach Ost verlaufenden Tal. Keine der um den Standort liegenden synthetischen Windstatistiken „löst“ diese kleinräumige, aber ausgeprägte Topographie hinreichend fein auf und zeigt die zu erwartenden Hauptwindrichtungen in Talausrichtung.

In diesem Fall würde der Immissionsgutachter darüber in Kenntnis gesetzt werden, dass für den Standort direkt keine hinreichend repräsentative synthetische Windstatistik zur Verfügung gestellt werden kann.

Für die Baden-Württembergischen Behörden steht ein Hilfswerkzeug (WSExpert Baden-Württemberg) zur Verfügung, das diese „Vorbegutachtung“ automatisiert vornimmt.

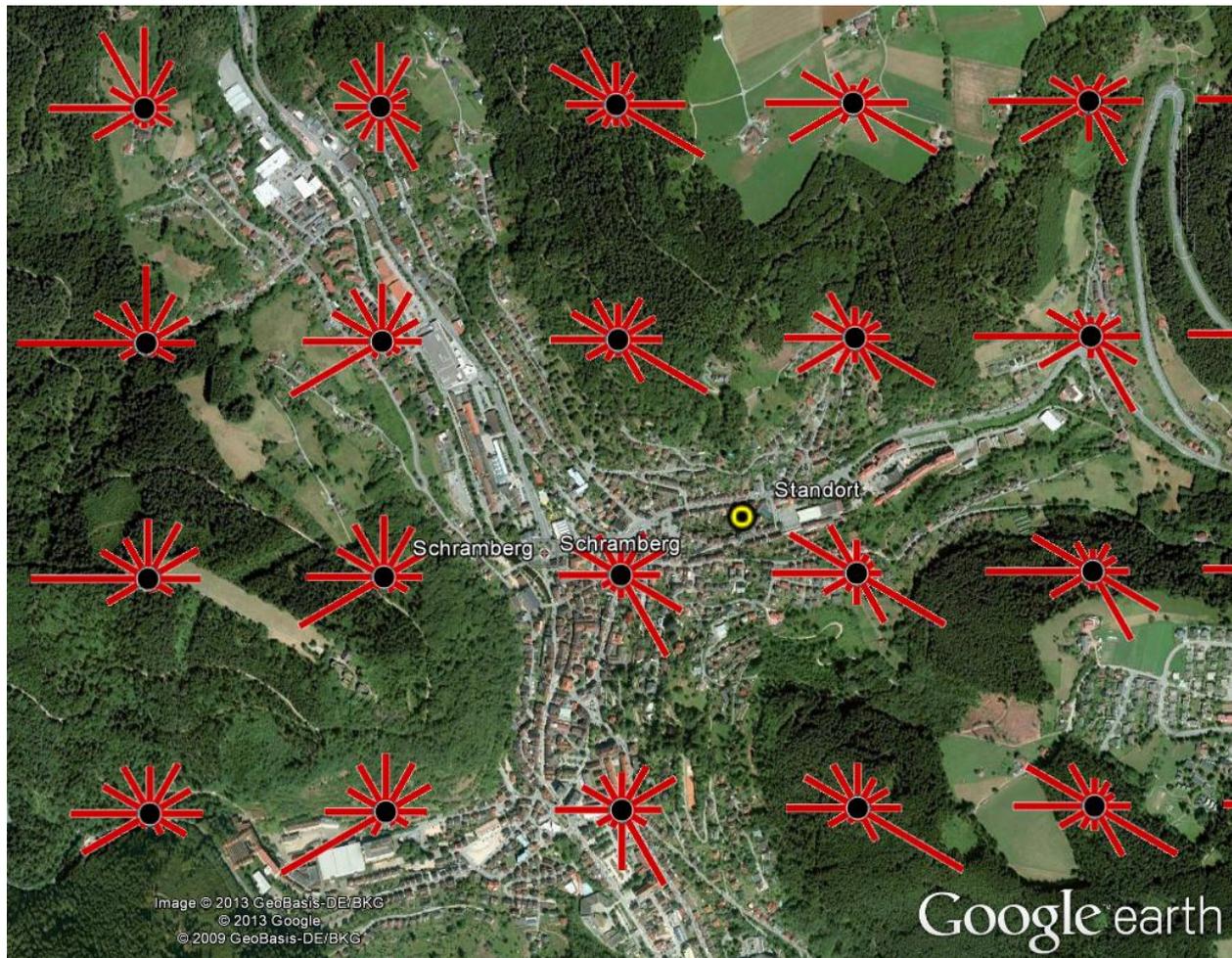


Abbildung 29: Synthetische Windrosen dargestellt in Google Earth™ im Gebiet um Schramberg.

#### 4.6 Repräsentativitätsprüfung im Einzelfall

Die Repräsentativitätsprüfung im Einzelfall erfolgt auf Anforderung eines Immissionsgutachters und für die von ihm verantwortete Vorgehensweise und zielt auf die Empfehlung und Bereitstellung einer geeigneten SynAKS.

Die SynAKS liegen flächendeckend in einer räumlichen Auflösung von 500 m vor und repräsentieren die langjährigen mittleren Verhältnisse auf den umgebenden Rasterflächen von 500 x 500 m<sup>2</sup>. Damit ist aber noch nicht gesagt, dass sie automatisch für jede Ausbreitungsrechnung an einem Standort innerhalb dieser Rasterflächen geeignet sind. Oder anders gesagt: Für eine Ausbreitungsrechnung ist nicht automatisch die dem Anlagenstandort nächstgelegene SynAKS geeignet.

Im Rahmen einer Repräsentativitätsprüfung wird im Einzelfall untersucht, welche der benachbarten SynAKS repräsentativ für die meteorologischen Verhältnisse ist, die im Rahmen einer Ausbreitungsrechnung als Antriebsdaten benötigt werden. Die Repräsentativitätsprüfung („RP“) weist damit gewisse Parallelen zu einer „Qualifizierten Prüfung der Übertragbarkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie der Ausbreitungsklasse“ („QPR“) auf, wie sie

beispielsweise der Deutsche Wetterdienst anbietet. Im Gegensatz zu der QPR geht es bei der RP jedoch in der Regel nicht um die Übertragung einer SynAKS an einen anderen Standort, da ja bereits für jeden Standort eine eigene SynAKS vorliegt. Vielmehr geht es um die Prüfung, welche der vielen SynAKS innerhalb des Rechengebietes der Ausbreitungsrechnung unter Berücksichtigung der gewählten Vorgehensweise am besten geeignet ist.

Die Festlegung der Vorgehensweise im Rahmen der Ausbreitungsrechnung liegt in der Verantwortung des Gutachters für die Immissionsprognose. Mit „Vorgehensweise“ ist hier die Wahl des Ausbreitungsmodells (AUSTAL2000, LASAT, ...), ggf. eines Windfeldmodells (diagnostisch, prognostisch, ...), ohne / mit Berücksichtigung von Gebäuden, Größe des Rechen- und Beurteilungsgebietes, Lage und Höhe der Quelle(n), Art der Immissionen (Stoffe, Geruch), usw. zu verstehen.

Die RP umfasst in der Regel folgende Untersuchungspunkte, die je nach Anforderung der speziellen Aufgabenstellung modifiziert oder ergänzt werden können:

- Qualitative Standortbeschreibung, Einbettung in die regionale Topographie;
- Beschreibung des Verwendungszwecks der SynAKS im Rahmen der vom Immissionsgutachter benannten Vorgehensweise;
- Räumliche Analyse synthetischer Windstatistiken im erweiterten Untersuchungsgebiet um den Anlagenstandort mit Bezug auf die topographischen Gegebenheiten und regionalen Anströmverhältnisse;
- Abschätzung subskaliger topographischer Einflüsse auf die Windverhältnisse am Standort;
- Abschätzung der räumlichen Repräsentativität der SynAKS am Standort bzw. in dessen direkter Nachbarschaft;
- Abschätzung der topographischen Einflüsse auf die Windverhältnisse im Rechengebiet auf Basis von Topographieanalyse und synthetischen Windstatistiken;
- Bewertung der Vorgehensweise hinsichtlich einer realitätsnahen Abbildung der topographischen Einflüsse auf die Windverhältnisse; Abgrenzung der vom Windfeldmodell zu reproduzierenden topographischen Einflüsse und der mit der SynAKS vorzugebenden Einflüsse im Sinne der VDI 3783 Blatt 13 Abschnitt 4.7.1;
- Auswahl einer SynAKS im Rechengebiet gemäß den im vorherigen Prüfschnitt definierten Anforderungen.

Im Ergebnis wird für die vom Immissionsgutachter genannte Vorgehensweise entweder die Verwendung der ausgewählten SynAKS an einem definierten Ersatz-Anemometer Standort empfohlen oder festgestellt, dass keine der in Standortumgebung vorliegenden SynAKS (für diese Vorgehensweise) geeignet ist.

## **5 Literatur**

- [1] Anke, K., Bigalke, K., Hüftle, F., Lohse, A., Rau, M. (2013): Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen SynRepAKTerm für Deutschland. Berechnung – Qualitätssicherung – Anwendung. Dokumentation der ARGE METCON IB Rau, Pinneberg, Heilbronn. Download unter <http://www.metsoft.de/downloads.html>.
- [2] TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz, technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24.07.2002. Gemeinsames Ministerialblatt, Nr. 25-29 S. 511 ff.
- [3] Kolb, H. (1975): Vergleich verschiedener Methoden der Übertragung von Statistiken der Ausbreitungsverhältnisse in orographisch modifiziertem Gelände. Arch. Met. Geophys. Bioklim. 24, 57-68.
- [4] Bigalke, K. (2007): Berechnung von Ausbreitungsklassenstatistiken auf Basis der synthetischen Windstatistiken für Baden-Württemberg. Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- [5] Frank, H. P., Landberg, L. (1997): Modelling the wind climate of Ireland. Boundary-Layer Meteorol., 85, 359-377.
- [6] Wagner, P. (1994): Das Bergwindssystem des Kinzigtals (Nordschwarzwald) und seine Darstellung im mesoskaligen Strömungsmodell MEMO. Freiburger Geographische Hefte, Nr. 45, ISSN 0071-0048.
- [7] VDI-Fachbereich Umweltmeteorologie. [Hrsg.] (2001): VDI-Richtlinie 3782, Blatt 1 - Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen.
- [8] Kanamitsu, M. et al. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). November 2002. Bul. of the Atmos. Met. Soc. 1631-1643.
- [9] European Environmental Agency (2009): CORINE Land Cover Data 2000. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-100-m-version-12-2009>.
- [10] metSoft GbR (2006): GlobDEM50 - Deutschland, Digitales Höhenmodell. Heilbronn.
- [11] Schlünzen, K.H. (1988): Das mesoskalige Transport- und Strömungsmodell METRAS – Grundlagen, Validierung, Anwendung. Hamburger Geophysikalische Einzelschriften, A88.
- [12] Schatzmann, M., Schlünzen, K.H., Dierer, S., Pankus, H. (1998): Entwicklung einer allgemein verfügbaren PC-Version des mesoskaligen Modells METRAS. Bericht an das Umweltbundesamt. FuE Projekt 104 04 354.
- [13] Schlünzen, K.H., Bigalke, K. (1998): METRAS PC, Version 1.0. Benutzerhandbuch. Herausgeber: Meteorologisches Institut der Universität Hamburg.
- [14] Dierer, S.(1997): Die Validierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells METRAS. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.

- 
- [15] Lüpkes, C., Schlünzen, K.H. (1996): Modelling the arctic convective boundary-layer with different turbulence parameterizations. *Boundary-Layer Meteorol.*, 79, 107-130.
- [16] Cappel, A., Kalb, M.(1976'): Das Klima von Hamburg - Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 141, Offenbach.
- [17] Schäfer, P.J. (1982): Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland - München. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 159, Offenbach.
- [18] Schlünzen, K.H. (1996): Validierung hochauflösender Regionalmodelle. Ber. Zentr. Meeres- und Klimaforschung HH, A23.
- [19] Schlünzen, K.H. (1990): Numerical study on the inland penetration of sea breeze fronts at a coastline with tidally flooded mudflats. *Beitrag Phys. Atmosph.*, 63 (3/4), 243-256.
- [20] Walz, U. (1997): Bewertung eines mesoskaligen Modells für die Simulation arktischer Kaltluftausbrüche anhand von Flugzeugmessungen. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.
- [21] DWD (2012): Winddaten für Windenergienutzer. 2. Auflage, Version 6. Offenbach.

## **Anhang Stationsdarstellungen**

- A1      Stationen der Gruppe 1**
- A2      Stationen der Gruppe 2**
- A3      Stationen der Gruppe 3**